

ANNA KOZANECKA-DYMEK
Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II

SYSTEMY *TENSE LOGIC* ORAZ ICH STOSOWALNO W NAUKACH PRZYRODNICZYCH

Wstęp. Systemy logiki temporalnej zaczęły być konstruowane pod koniec pierwszej połowy ubiegłego stulecia. Do dnia dzisiejszego skonstruowanych zostało wiele różnych systemów temporalnych. Mianem logiki temporalnej określane są m.in.: systemy *tense logic* (których prekursorem jest A. N. Prior), systemy logiki temporalnej G. H. von Wrighta, logika czasu fizykalnego N. Reschera i A. Urquharta (zawierająca zmienną czasową), systemy logiki czasu interwałowego (np. systemy J. van Benthema), logiki temporalne budowane w różnych wersjach języków hybrydowych (np. systemy C. Arecesa), a obecnie przede wszystkim systemy temporalne wykorzystujące pojęcie czasu w programach komputerowych (od standardowych systemów PTL po różne wersje logiki czasu rozgałęzionej)¹. Wymienione logiki są od siebie niezależne (różni się między innymi występującymi na ich gruncie specyficznymi funktorami temporalnymi), mają jednak wspólną własność: formalizują (na różne sposoby) niektóre wyrażenia czasowe.

Systemom logiki temporalnej, w związku z formalizacją zwrotów czasowych i kodyfikacją wnioskową uwzględniających takie zwroty, można stawiać różne zadania (ponieważ istnieje wiele różnych systemów logiki temporalnej, oczywistym jest, iż zadania im stawiane również są odmiennej natury). Jedno ze stanowisk w tej kwestii głosi, że niektóre systemy logiki temporalnej, a zwłaszcza ich język, mogłyby znaleźć zastosowanie na gruncie nauk przyrodniczych, głównie fizyki i kosmologii (zwłaszcza w odniesieniu do elementu czasowego w tych

¹ Próba usystematyzowania systemów logiki temporalnej podjęłam w: A. Kozanecka: *O rodzajach logiki temporalnych*. „Roczniki Filozoficzne” 55 (2007) nr 1, s. 189-199.

naukach). Dotyczy to zwłaszcza systemów temporalnych von Wrighta oraz systemów *tense logic*. Używając dalej pojęcia „logika temporalna” będzie miała na myśli przede wszystkim systemy *tense logic*, o których traktuje ten artykuł.

W literaturze pojawiła się praca, w której analizowana jest możliwość wykorzystania w przyrodoznawstwie systemu temporalnego *And Then* skonstruowanego przez von Wrighta: A. Kozanecka, M. Leszczyńska: *O wyrażeniu niektórych relacji czasowych i własności czasu w języku systemów logiki temporalnej G. H. von Wrighta*². Rozważania zawarte w niniejszym artykule skupią się na odpowiedzi na pytanie, czy takie zastosowanie mogłyby znaleźć systemy *tense logic*. Faktem jest, iż w literaturze przedmiotu powyższe zagadnienie wciąż jest dyskutowane w sposób niewystarczający.

Celem artykułu będzie w takim razie odpowiedź na pytanie, czy systemy *tense logic* spełniają warunki stawiane systemom, które miałyby być zastosowane w naukach realnych, i czy w związku z tym tego rodzaju systemy temporalne mogłyby być stosowane w naukach przyrodniczych, głównie w fizyce. Na początku niniejszego artykułu przedstawione zostaną te warunki, potem podana zostanie definicja czasu oraz omówione zostaną pokrótce najważniejsze jego własności. Następnie przedstawione zostaną syntaktyczne charakterystyki systemów *tense logic*. W końcu w ramach tego artykułu spróbuje się odpowiedzieć na postawione wyżej pytanie o możliwość stosowania tych systemów na gruncie nauk przyrodniczych, zwłaszcza fizyki.

Przedtem, zanim odpowiem na pytanie o możliwość zastosowania systemów *tense logic* w naukach przyrodniczych, przedstawione zostaną pokrótce warunki, jakie spełnia powinien system mający znaleźć zastosowanie w jakiejś nauce realnej.

Na przestrzeni lat różne dyscypliny naukowe ubogacały się i wciąż ubogają, w związku z czym wzbogaca się także język nauki. Do dokładnego wyrażenia swoich coraz to nowszych poznawczych rezultatów poszczególne typy wiedzy, przede wszystkim nauki przyrodni-

²A. Kozanecka, M. Leszczyńska: *O wyrażeniu niektórych relacji czasowych i własności czasu w języku systemów logiki temporalnej G. H. von Wrighta*. „Roczniki Filozoficzne” 55 (2007) nr 2, s. 43-65.

cze, potrzebuj odpowiedniego j zyka - cislego i precyzyjnego. Ka da nauka powinna bowiem zmierza do tego, eby jej j zyk był adekwatny do wyra ania formułowanych na jej gruncie praw, hipotez, definicji itp. W zwi zku z tym niektóre nauki mog si gn do rodków j zykowych i aparatury inferencyjnej wypracowanych przez logik formaln , gdy logika stara si sprecyzowa sens niektórych terminów wyst puj cych we wszystkich j zykach: potocznym, sztucznych i w j zykach poszczególnych dyscyplin naukowych (ł cz cych j zyk potoczny ze sztucznym), oraz sformułowa prawa racjonalnego rozumowania, w którym takie terminy wyst puj . Systemy logiki formalnej zawieraj tzw. stałe logiczne, które mog słu y do wyra ania my li z wi ksz precyzj ni za pomoc ich potocznych odpowiedników oraz, odpowiednio symbolizowane, do ukazania formalnej struktury rozumowa przeprowadzanych w j zyku potocznym lub w j zykach ró nych nauk. J zyki formalne mog by zatem adekwatnymi rekonstrukcjami j zyków naturalnych (ich cz ci) odpowiednio do pewnych celów.

W zwi zku z powy szymi ustaleniami stwierdzi mo na, e systemy formalne powinny przede wszystkim *dostarcza* danej dziedzinie naukowej (na gruncie której miałyby by zastosowane) *cisłego, formalnego j zyka* do precyzyjnego wyra ania niektórych jej rezultatów poznawczych. System logiczny, eby nadawał si do formalizowania pewnych tez danej nauki, musi odpowiednio formalizowa niektóre zwroty wyst puj ce na jej gruncie (struktura j zykowa danego systemu logicznego musi by struktur j zyka, w którym wyra ona jest jaka teoria dotycz ca wiata realnego). Dobrze skonstruowany i odpowiednio u ty system logiczny ma równie za zadanie *dostarczenie odpowiedniej aparatury inferencyjnej* do odwzorowania niektórych niezawodnych rozumowa przeprowadzonych w j zyku danej dyscypliny naukowej, na gruncie której system ten miałyby znale zastosowanie.

Wobec tego, i głównym zadaniem systemów logiki temporalnej, które miałyby znale zastosowanie na gruncie fizyki (i filozofii nauki), jest dostarczanie cisłego j zyka (poprzez formalizowanie pewnych zwrotów czasowych) do precyzyjnego wyra ania praw i hipotez fizyki

wyraonych w języku wyobraźniowym³ (oraz odpowiednich twierdzeń filozoficznych) związanych z czasem i czasami relacji, jak jest relacja wczemu/nie/później. Właściwe systemy temporalne powinny także dostarczyć aparatury inferencyjnej do odwzorowania niezawodnych rozumowań zawierających wyrażenia czasowe i przeprowadzonych w wyobraźniowym języku fizyki.

Samo formalizowanie pewnych zwrotów występujących w języku danej nauki nie jest jednak wystarczającym warunkiem do zastosowania systemu logicznego na jej granicy. Zastosowanie takiego systemu formalnego mogłoby znaleźć tylko wtedy, gdy będzie wartością poznawczą. Należy zatem odpowiedzieć teraz na pytanie, na podstawie jakich treści można stwierdzić, czy istniejące systemy logiki temporalnej dostarczają formalnego języka, który można by z pomocą poznawczym stosować w fizyce i w kosmologii?

Uwzględniam tutaj trójpoziomy model poznania wprowadzony przez Arystotelesa: rzeczywistość (element najbogatszy treściowo) - myślenie (umysłowy obraz rzeczywistości) - język (językowy obraz będący wyrazem umysłowego obrazu świata). W związku z tym podejściem język uznawany jest za narzędzie komunikowania wyników poznawczych. Natomiast wartość poznawczą języka warunkowana jest tym, czy za jego pomocą poznawanie rzeczywistości można przedstawić adekwatnie. W związku z preferowanym podejściem do języka można przyjąć, że warunkiem posiadania przez system logiczny wartości poznawczej byłyby możliwość adekwatnego opisywania, za pomocą formalnego języka tego systemu, pewnego aspektu rzeczywistości, którym zajmuje się dyscyplina, na granicy której system ten miałby być stosowany. Koniecznym warunkiem adekwatności jest także prawdziwość, dlatego też stwierdzić można, że *tezy adekwatnych systemów logicznych powinny*

³ Fizyka, obok języka matematycznego, posługuje się także drugim językiem, którym jest tzw. *język wyobraźniowy* (związany z językiem matematycznym) zbliżony do języka potocznego, ale wzbogacony specjalistyczną terminologią. Kluczowymi terminami przedmiotowymi występującymi w języku wyobraźniowym współczesnych teorii fizycznych są m.in. terminy: „czas”, „zmiana”, „przyczyna”, „przestrzeń”, „energia”. Za pomocą języka wyobraźniowego opisuje się w sposób bardziej zrozumiały to, co jest wyrażane w języku matematyki; za jego pomocą można mówić o eksperymentach i przekazywać zmysłowo uchwytne obrazy przyrody, a zwłaszcza można adekwatnie wyrażać niektóre prawa fizyki o charakterze jakościowym, głównie - prawa przyczynowe (por. W. Heisenberg: *Ponad granicami*. Warszawa 1979).

prawdziwie przedstawia pewien aspekt rzeczywistości, którym zajmuje się dana dziedzina⁴.

Z uwagi na fakt, że główną dyscypliną nauk przyrodniczych jest fizyka, logika temporalna dla tego typu nauk powinna w pewien sposób respektować ustalenia dotyczące własności czasu i relacji czasowych, które zostały sformułowane właśnie na gruncie współczesnej fizyki (respektować powinna także podstawowe założenia nauk przyrodniczych charakteryzujące strukturę przyrody, m.in. zasady indukcji i zasady czciowej to samo ci⁵).

Wobec tego, warunkiem zastosowania systemów logiki temporalnej w naukach przyrodniczych, zwłaszcza w fizyce, jest adekwatne wyrażenie przez te systemy, za pomocą aksjomatów i twierdzeń, niektórych własności czasu fizycznego i relacji wzajemnej: *specyficzne aksjomaty i twierdzenia adekwatnych systemów temporalnych muszą być zdaniem prawdziwymi w fizycznym modelu czasu*⁶ (a reguły logiczne tych systemów powinny wcielić intuicyjnie słuszne reguły wnioskowania używane w traktowaniu o czasie, a więc prowadzi od zda prawdziwych do zda prawdziwych). Oczywiście oprócz tego znaczenie mają również formalne własności systemów, zwłaszcza niesprzeczność.

Jak widać, ocenianie logik nieklasycznych pod kątem ich adekwatności do przedstawiania tez określonych nauk realnych, jest ściśle związane z przeprowadzaniem pewnych dociekań, ze szczególnego punktu widzenia, wiążących się z dziedzinami nauk realnych, które mają być polem zastosowania tych systemów. Są to dociekania typu filozoficznego, należące do filozofii nauki. W związku z tym, przed przystąpieniem do oceniania wartości poznawczej systemów logiki temporalnej dla nauk przyrodniczych, należy uwzględnić założenia dotyczące czasu przyjęte

⁴ Może mieć bowiem miejsce taka sytuacja, że język jakiego systemu logicznego formalizowałby niektóre zwroty występujące na gruncie danej dyscypliny naukowej, ale tezy tego systemu nie odzwierciedlałyby w sposób prawdziwy pewnego aspektu rzeczywistości, którym zajmuje się ta dyscyplina. Wówczas taki system nie pełniłby w stosunku do niej funkcji systemu wartościowego poznawczego i nie mógłby być stosowany na jej gruncie.

⁵ Zasada indukcji mówi o tym, że istnieje w przyrodzie ład polegający na tym, iż w podobnych warunkach powtarzają się elementy (np. cząstki elementarne, rzeczy, zdarzenia). Natomiast zasada czciowej to samo ci stwierdza, że powtarzają się również zespoły, układy elementów.

⁶ System temporalny powinien abstrahować od spornych własności czasu, powinien być jak najogólniejszy, gdy przez to rozszerzają się możliwości jego zastosowania.

głównie w fizyce i kosmologii, a tak e si gn do pewnej filozofii czasu opartej na wiedzy fizycznej. Niezb dna jest charakterystyka modeli czasu w sensie fizycznym, która zostanie teraz przedstawiona. Dopiero w oparciu o te ustalenia mo na ocenia adekwatno systemów logiki temporalnej do przedstawienia własno ci czasu i odpowiedniej relacji czasowej, a nast pnie wybra najbardziej adekwatny system temporalny dla danej teorii naukowej fizyki lub kosmologii.

II. Rozpoczynaj c rozwa ania dotycz ce czasu fizycznego przede wszystkim zaznaczy nale y, e nie istnieje jego jedna, uniwersalna koncepcja. Koncepcji tych na gruncie fizyki współczesnej jest kilka, a zale one od tego, jakie przyjmie si *zało enia* w danej teorii fizycznej, implikuj ce okrelone własno ci czasu i relacje czasowe. Analizuj c zatem własno ci czasu nale y najpierw „wydoby ” je z teorii fizycznych; zajmuj si tym filozofowie nauki⁷.

Podstawowe własno ci czasu przyjmowane przez teorie fizyczne wyra one s w aparacie matematycznym, którego podstaw jest aparat teorii mnogo ci. Zakłada go tak e procedura arytmetyzacji czasu b d ca podstaw jego pomiaru. Dlatego te , przy omawianiu zagadnie zwi zanych z czasem, stosowana b dzie aparatura poj ciowa teorii mnogo ci.

Zaznaczy tak e trzeba, i w artykule tym prowadzona jest charakterystyka czasu w separacji od przestrzeni. Jest to zasadne, poniewa czas, tak jak przestrze , jest wyrónionym wymiarem czasoprzestrzeni, a poza tym ma odr bne od nich własno ci⁸.

Przyjmijmy zatem, e w fizyce czas mo na traktowa jako teorii mnogo ciowy zbiór momentów uporządkowany liniowo przez relację czasowego nast pstwa: $C = (M, <)$, gdzie M jest zbiorem *momentów* (t_1, t_2, t_3, \dots), za $<$ binarn *relacją czasowego nast pstwa* (nazywan inaczej relacją poprzedzania lub relacją wcze niej / pó niej) okrelon na poszczególnych momentach nale cych do M^9 . Relacja czasowego

⁷ Fizyka bowiem nie zajmuje si wprost własno ciami czasu jako ciowymi. Interesuj j własno ci czasu metryczne, zwi zane z pomiarem.

⁸ Przykładowo przestrze jest obiektem trójwymiarowym, czasoprzestrze cztero wymiarowym, a czas jest jednowymiarowy.

⁹ Por. Z. Augustynek: *Własno ci czasu*. Warszawa 1970. s. 29; R. Klimek: *Wprowadzenie do logiki temporalnej*. Kraków 1999, s. 18; oraz K. Trz sicksi: *Logika temporalna. Wybrane zagadnienia*. Białystok 2008, s. 45, 84.

następstwa $<$, jako liniowo porządkujca zbiór, ma następujące własności:

azwrotno : $\forall t \in M \sim (t < t)$,

asymetryczno : $\forall t_1, t_2 \in M [(t_1 < t_2) \sim (t_2 < t_1)]$,

przechodnio : $\forall t_1, t_2, t_3 \in M [(t_1 < t_2) \wedge (t_2 < t_3) \rightarrow (t_1 < t_3)]$,

spójno : $\forall t_1, t_2 \in M [(t_1 < t_2) \vee (t_1 = t_2) \vee (t_2 < t_1)]^{10}$.

„ $t_1 < t_2$ ” czyta się: moment t_1 jest *wcześniej* od momentu t_2 , moment t_2 jest *później* od momentu t_1 ; „ $t_1 = t_2$ ” czyta się: moment t_1 jest *równoczesny* z momentem t_2 .

Niekwestionowaną własnością relacji czasowego następnictwa jest przechodniość.

Definiując czas jako zbiór momentów, przez *moment* rozumie się teoretyczny zbiór zdarzeń wzajemnie *równoczesnych* zawarty (w sensie inkluzji) w *wieści materialnym*.

Pojęcie *zdarzenia* jest pojęciem pierwotnym, niedefiniowalnym. Uwaga: dalej pojęcie „zdarzenie” będzie miało na myśli zdarzenie czasoprzestrzennie nierozciągliwe (punktowe), *infinitesimalne*, np. zderzenie dwóch cząstek elementarnych.

wieści materialny (S) to teoretyczny zbiór wszystkich zdarzeń (x, y, z, \dots) .

Przez *relację równoczesności* (R) rozumie się natomiast dwuczłonową relację między zdarzeniami (w ogólnym przypadku przestrzennie odległymi), a więc określoną w S, definiowaną następująco: jeżeli z punktów przestrzennych p_1 i p_2 , w których zachodzą odpowiednio zdarzenia x i y , wychodzą równocześnie z zachodzeniem tych zdarzeń sygnały świetlne (które rozchodzą się ze stałą prędkością ok. 300 000 km/sek.), to zdarzenia x i y są równoczesne wtedy i tylko wtedy, gdy

¹⁰ Zbiór momentów jest uporządkowany liniowo (przez relację poprzedzania) w sensie nawijającym do ujęcia J. Cantora. W innym ujęciu relacja liniowo porządkujca ma niektóre własności inne niż u Cantora: jest zwrotna, antysymetryczna, przechodnia i spójna (por. L. Borkowski: *Wprowadzenie do logiki i teorii mnogości*. Lublin 1991. s. 271-272). Relacja równoczesności dla momentów jest relacją równoważności.

sygnały te zbiegają się równocześnie w punkcie rodkowym interwału przestrzennego między punktami p_1 i p_2 ¹¹.

Relacja równocześnieści R określona w zbiorze zdarzeń jest zwrotna, symetryczna i przechodnia (R jest zatem w S relacją równoważności). Właśnie ci te zachodzą w danym inercyjnym układzie odniesienia¹² (i są empirycznie stwierdzone na gruncie szczególnej teorii względności). Nie ma zatem absolutnej równocześnieści. Relacja równocześnieści jest *względna*, tzn. zrelatywizowana do inercyjnego układu odniesienia¹³. Wobec tego moment, a zatem także i czas, jako zbiór momentów, jest względny.

Podana wyżej definicja czasu określona za pomocą pojęcia relacji równocześnieści R jest definicją czasu przez abstrakcję. Jest ona przyjmowana przede wszystkim na gruncie szczególnej teorii względności. Natomiast definiując czas przez abstrakcję na gruncie ogólnej teorii względności, trzeba przystąpić do jego lokalnego charakteru (implikowanego przez lokalność relacji R). Zaletą tego rodzaju definicji jest fakt, iż definicja ta, poza tym, że jest merytorycznie i formalnie poprawna, jest ogólna i nie zawiera informacji o szeregu własności czasu, głównie topologicznych, które omówi w dalszej części artykułu. Takie informacje (często niezgodne ze sobą) pochodzą z relatywistycznej teorii czasu, której podstawą jest teoria względności, mechaniki kwantowej, kwantowej teorii pola, kosmologii przyrodniczej itd. Podana definicja czasu wyklucza natomiast model czasu - okręgu oraz czas rozgałęziony.

Właśnie ci czasu dzielą się głównie na jakościowe (topologiczne - nazywane tak w analogii do topologicznych własności przestrzeni) i ilo-

¹¹ Por. Z. Augustynek: *Własności czasu*, s. 9-12. W definicji równocześnieści nie ma błędnego koła, gdy w definiowaniu chodzi o równocześnieść w punkcie, czyli o koincydencję czasoprzestrzenną.

¹² Inercyjne układy odniesienia (układy Galileuszowe) to układy poruszające się względem siebie bez przyspieszenia; jednostajnie i prostoliniowo. Takich układów dotyczy szczególna teoria względności. Ziemia jest inercyjnym układem odniesienia tylko w przybliżeniu (wiruje wokół własnej osi). Ogólna teoria względności dotyczy dowolnych układów odniesienia - poruszających się z przyspieszeniem.

¹³ Znaczący to, że jeżeli przestrzennie odległe zdarzenia x i y są równoczesne względem układu U , to nie są one równoczesne względem układu W , poruszającego się odnośnie układu U . Na gruncie szczególnej teorii względności czas i przestrzeń są względne, absolutna jest za czasoprzestrzeń.

ciowe (metryczne¹⁴). Zanim przejd do charakterystyki własno ci topologicznych czasu, wprowadz poj cie współrz dnej momentu, które pojawi si w dalszych rozwa aniach.

Współrz dn momentu t jest pewna liczba rzeczywista przyporzkowana momentowi czasu t przez funkcj /. Funkcja/przyporzkowuje ka demu momentowi czasu: $t_1, t_2, t_3, \dots \in M$ pewn liczb rzeczywist . Funkcja ta nazywana jest *układem współrz dnych* w M . Dziedzina funkcji / jest zatem zbiór momentów uporzkowany przez relacj poprzedzania $<$, tj. czas C , a przeciwdziedzina zbiór wszystkich liczb rzeczywistych (\mathbb{R}) uporzkowany przez relacj mniejszo ci arytmetycznej $<$. Funkcja / jest wzajemnie jednoznaczna (ró nym momentom przyporzkowuje ró ne współrz dne), czyli stanowi odwzorowanie czasu C na zbiór liczb rzeczywistych \mathbb{R} . Jest to odwzorowanie izomorficzne czasu uporzkowanego przez relacj poprzedzania $<$ w zbiór liczb rzeczywistych uporzkowany przez relacj mniejszo ci arytmetycznej $<$. Oznacza to m.in., e moment t_1 jest wcze niejszy od t_2 wtedy i tylko wtedy, gdy współrz dna t_1 jest mniejsza od współrz dnej t_2 . Funkcja / odwzorowuje zatem porz dek czasowy mi dzy momentami czasu w porz dek arytmetyczny mi dzy liczbami rzeczywistymi. Na skutek izomorfizmu mi dzy zbiorem momentów a zbiorem liczb rzeczywistych uto samia si czasem współrz dn momentu z samym momentem¹⁵. Zbiór, w którym został okre lony układ współrz dnych, nazywa si przestrzeni skoordynatywowan (przestrzeni parametrów). Układ współrz dnych koordynatyzuje ten e zbiór. Czas stanowi zatem tak przestrze .

Procedura koordynatyzacji czasu zawiera w zasadzie wi kszo zało onych w fizyce własno ci topologicznych czasu. Procedura ta zakłada, e czas jest homeomorficzny z prost euklidesow i w zwi zku z tym posiada wszystkie własno ci tej prostej. Z ró nych zało e teorii fizycznych wynikaj jednak tak e inne własno ci czasu. Wi kszo ba-

¹⁴ Według szczególnej teorii wzgl dno ci własno ci metryczne czasu (głównie długo interwału czasu) zale od inercyjnego układu odniesienia, jego pr dko ci oraz od własno ci metrycznych przestrzeni. Według ogólnej teorii wzgl dno ci - zale tak e od nat enia pola grawitacyjnego.

¹⁵ Por. Z. Augustynek: *Własno ci czasu*, s. 47-51.

daczy nie godzi si z tym, e matematycznym modelem czasu jest prosta i rozpatruj tak e inne jego modele (model czasu - półprostej i czasu - odcinka) i inne jego własno ci, które zostaną omówione w dalszej cz ci artykułu. Przejd my zatem do charakterystyki topologicznych własno ci czasu.

W fizyce, niezmiennie od czasów Galileusza, przyjmuje si , e czas jest jednowymiarowy. Zało enie to wywodzi si z koordynatacji czasu - ka demu momentowi przyporzdtkowana jest wzajemnie jednoznacznie *jedna i tylko jedna* liczba jako jego współrz dna.

W naukach przyrodniczych pocz wszy od ich powstania przyjmuje si równie zało enie, e czas jest ci gły. Zało enie ci gło ci czasu tak e ma zwizek z realizowaniem zwykłej procedury jego koordynatacji, polegajcej na przyporzdtkowaniu ka demu momentowi czasu wzajemnie jednoznacznie pewnej *liczby rzeczywistej* jako jego współrz dnej. Je eli za przyjmuje si , e czas jest zbiorem g stym, to wtedy ka demu momentowi czasu przyporzdtkowana jest wzajemnie jednoznacznie pewna *liczba wymierna*.

Czas C jest nazywany *g stym*, je li $V \{1, 1_2\} \in M$,

$t_1 < t_2 \rightarrow \exists t_3 \in M (t_1 < t_3 < t_2)$.

Nie ma momentów nastpujących bezpo rednio po sobie. Zawsze, dla dwóch dowolnych momentów czasowych, nawet tych znajdujących si bardzo blisko siebie, mo na wyznaczy nowy moment le cy mi dzy nimi¹⁶.

Zało enie ci gło ci czasu zostało uzasadnione w oparciu o makrodo wiadczenie, w ramach danych fizyki klasycznej. Tak e w teorii wzgl dno ci przyjmuje si , e czas ma natur ci gł . Inaczej wygl da sprawa z ekstrapolacj ci gło ci czasu na mikropoziom. W tradycyjnej mechanice kwantowej czas jest ci gły. Jednak niektórzy badacze (m.in. V. Ambarzumian, D. Iwaenko, H. Snyder, H. Coish) przyj li niegdzi zało enie, e na jej gruncie czas ma natur skwantowan i starali si operowa pojmieniem czasu dyskretnego.

¹⁶ Pomiarowe rozró nienie, czy czas jest ci gły, czy g sty nie jest mo liwe, gdy pomiary interwałów czasu nie s nigdy absolutnie dokładne. Definicja ci gło ci czasu jest skomplikowana (wymaga j zyka drugiego rz du), dlatego ograniczam si do podania, wystarczajcej do naszych rozwa a , definicji g sto ci czasu.

Czas C jest nazywany *dyskretnym*, je li $\forall t_3, t_2 \in M$ spełnione s warunki:

$$t_j < t_2 \rightarrow \exists t_3 \in M [(t_j < t_3 \wedge t_3 < t_2) \wedge \neg \exists t_4 \in M (t_j < t_4 \wedge t_4 < t_3)]$$

$$t_2 < t_1 \rightarrow \exists t_3 \in M [(t_2 < t_3 \wedge t_3 < t_1) \wedge \neg \exists t_4 \in M (t_3 < t_4 \wedge t_4 < t_1)]$$

Zastosowali inn procedur koordynatyacji czasu, polegaj c na przyporządkowaniu ka demu momentowi wzajemnie jednoznacznie pewnej *liczby całkowitej* jako jego współrz dnej. Dla dwóch s iaduj - cych ze sob momentów czasowych nie da si wówczas wyznaczy nowego momentu le cego mi dzy nimi. Przyj to, e istniej bezpo rednio po sobie nast puj ce, s iaduj ce ze sob wielko ci czasu zwane kwantami czasu lub chrononami. W kwantach czasu zachodz elementarne zdarzenia takie, jak np. rozpad cz steczek elementarnych.

W zwi zku z tym, e w otoczeniu osobliwo ci wszystkie zjawiska maj kwantowy charakter obecnie przyjmuje si , e zaraz po Wielkim Wybuchu czas istniał w postaci dyskretnych kwantów oraz, e rozpada si na kwanty równie w osobliwo ci wewn trz czarnej dziury. Niektórzy fizycy uwa aj , e model czasu dyskretnego mo e okaza si przydatny w rozwijaniu kwantowej teorii grawitacji. Model tego typu zaproponował P. Caldirola (jeden chronon odpowiada u niego $2 \cdot 10^{23}$ sekundy)¹⁸ . Niewykluczone jest, e wraz z rozwojem fizyki trzeba b dzie przyj własno czasu, jak jest dyskretno (na mikropoziomie rzeczywisto ci fizycznej).

Przedstawiaj c własno ci czasu nie sposób równie pomin pytania o jego sko czono lub niesko czono - w sensie posiadania lub niepo-

¹⁷ Por. R. Klimek: *Wprowadzenie do logiki temporalnej*, s. 19; oraz K. Trz sicksi: *Logika temporalna. Wybrane zagadnienia*, s. 90. $t_1 < t_2$ wtedy i tylko wtedy, gdy $t_1 < t_2$ lub $t_1 = t_2$.

Zob. P. Caldirola: *The introduction of the chronon in the electron theory and a charged lepton mass formula*. “Lettere Al Nuovo Cimento” 27 (1980) nr 8, s. 225-228.

siadania przez niego określonej granicy, tj. momentu początkowego i / lub momentu końcowego¹⁹.

Przyjmując, że modelem czasu jest prosta, przyjmuje się, że czas jest nieskończony²⁰. Jednak na gruncie fizyki zakładane są także inne jego modele, które zostaną teraz omówione.

Czas traktowany może być jako zbiór (linia) z punktem początkowym i / lub końcowym lub zbiór bez takich punktów. W przypadku czasu chodzi oczywiście o momenty:

Czas C nie posiada momentu początkowego, jeżeli: $V_1 \neq 0, t_2 < t_1$;

Czas C nie posiada momentu końcowego, jeżeli: $V \neq 0, t_2 > t_1$;

Czas C posiada moment początkowy, jeżeli: $V \neq 0, t_2 < t_1$;

Czas C posiada moment końcowy, jeżeli: $V \neq 0, t_2 > t_1$ ²¹.

Czas może być zatem traktowany jako:

- posiadający moment początkowy i końcowy: model czasu - odcinka,
- posiadający moment tylko początkowy (lub tylko końcowy): model czasu - półprostej,
- nieposiadający momentu początkowego i końcowego: model czasu - prostej²².

Modelami czasu nieskończonego są modele czasu - prostej i półprostej. Modelem czasu skończonego jest model czasu - odcinka. Oprócz wymienionych modeli istnieje także model czasu - okręgu (który ma własności topologiczne krzywej zamkniętej, homeomorficznej z okręgiem), oraz model czasu rozgałęzionego. Modele te są wykluczane przez przyjmowaną na gruncie fizyki definicję czasu, dlatego te nie będą ich omawiać. Pamiętaj jednak należy, że jednoznacznie się tych modeli nie odrzuca.

¹⁹ Nie należy utożsamiać skończoności z nieskończonością czasu ze skończonością zbioru momentów czasowych. Nie chodzi tu również o ograniczoną lub nieograniczoną liczbę momentów.

²⁰ Koncepcja czasu - prostej implikowała założenia przyjęte w mechanice klasycznej.

²¹ Por. K. Trzaskowski: *Logika temporalna. Wybrane zagadnienia*, s. 93 oraz R. Klimek: *Wprowadzenie do logiki temporalnej*, s. 20.

²² Por. Z. Augustynek: *Własności czasu*, s. 111-115. Model czasu - prostej w dwuwymiarowym przestrzeni metrycznej (przestrzeni topologicznie metryzowalnej) ma własności topologiczne tej prostej. Analogicznie, model czasu - odcinka ma własności topologiczne odcinka, a model czasu - półprostej ma własności topologiczne półprostej.

Problem dotyczący skończoności lub nieskończoności czasu (w sprecyzowanym wyżej sensie) na gruncie współczesnej nauki zasadniczo uwikłany jest w szerszy kontekst: powyższych własności wszechświata badanych na gruncie kosmologii przyrodniczej. Stąd rozwiązanie tego problemu uzależnione jest od odpowiedzi na pytanie o czasowość i wieczność wszechświata. Bez specjalnego zagłębienia się w tę kwestię odnotujemy, iż na gruncie kosmologii i fizyki, w oparciu o dane ogólnej teorii względności i termodynamiki, przytacza się dwa główne argumenty za *początkiem* czasowym kosmosu, czyli zaistnieniem absolutnie pierwszego zdarzenia.

Najczęściej przyjmuje się, że *czas powstał wraz z początkiem zaistnienia wszechświata* w momencie Wielkiego Wybuchu²³ (ang. *Big Bang*) - nazywanego także *czasem osobliwym* lub *singularnym stanem wszechświata*²⁴.

Pierwszym argumentem za tym, że wszechświat posiada czasowy początek, jest tzw. teoria ekspansji przestrzennej wszechświata²⁵. W latach 1921-1929 E. Hubble²⁶ dokonał odkrycia, iż odległe galaktyki oddalają się od nas (wykazują przesunięcia ku czerwieni wprost proporcjonalne do ich odległości od Ziemi), co wskazuje na to, iż wszechświat nie jest statyczny, ale stale się rozszerza. Kilka miliardów lat temu, w chwili Wielkiego Wybuchu, musiał być on zatem skupiony na małej przestrzeni (odległości między galaktykami była zerowa), a jego gęstość była nieskończona. Nieskończona była także temperatura

²³ Gdyby nawet istniał czas przed Wielkim Wybuchem (niektórzy badacze przyjmują taką hipotezę), to był on wówczas nieokreślony; zdarzenia sprzed Wielkiego Wybuchu nie miały dla nas żadnego znaczenia, nie mogły mieć wpływu na to, co dzieje się obecnie. Dlatego przyjmuje się, że czas rozpoczął się wraz z Wielkim Wybuchem (przed *Big Bangiem* nie istniał ani czas, ani przestrzeń, ani materia).

²⁴ Pytanie o początek czasowy wszechświata zakłada, że istnieje czas kosmologiczny, jeden dla całego kosmosu, a jest to możliwe tylko wtedy, gdy wszechświat można na „pokry” globalnie jednym układem odniesienia współporuszającym się z materią, co jest raczej czymś wyjątkowym w kosmologii. Dlatego na jej gruncie operuje się raczej geometrycznym odpowiednikiem początku Wielkiego Wybuchu, tzn. pojęciem „osobliwego początku”, które nie zależy od wyboru układu odniesienia (por. M. Heller, M. Lubanski, Sz. W. Łąga: *Zagadnienia filozoficzne współczesnej nauki*. Warszawa 1992. s. 243-250. Więcej na temat osobliwego zob. np. M. Heller: *Osobliwy wszechświat*. Warszawa 1991).

²⁵ Zob. C. Supplee: *Fizyka XX wieku*. Warszawa 2001. s. 183-188 i 193-213.

²⁶ W 1922 roku A. Friedmann wyprowadził równania postulujące rozszerzanie się wszechświata. Niezależnie od niego, w 1927 roku wyprowadził je również G. Lemaitre.

wszech wiata, która spadała w miarę jego rozszerzania się. Jeżeli za wszechwiat zaczął się rozszerzać w czasie, zaczął także istnieć w czasie, czyli miał początek; materia nie istniała wiecznie przed początkiem rozszerzania się.

Teoria Wielkiego Wybuchu wywoływała początkowo sprzeciw niektórych naukowców, m.in. F. Hoyle'a, T. Golda i H. Bondiego - twórców teorii stanu stacjonarnego kosmosu, która zakładała, że wszechwiat trwa w tym samym stanie: jego rednię gęstość pozostaje niezmieniona w czasie. Próbowali oni zatem uniknąć wniosku, że wszechwiat zaczął się od Wielkiego Wybuchu.

Przez pewien czas naukowcy byli podzieleni, jeżeli chodzi o poparcie dla tych teorii. Jednak odkrycie mikrofalowego promieniowania tła w 1965 roku przemówiło za prawdziwością modelu teorii Wielkiego Wybuchu. Współczesne obserwacje przemawiające za jego prawdziwością to m.in. zjawisko ucieczki galaktyk, istnienie prawie idealnie jednorodnego promieniowania tła (łącznie z jego nieregularnościami) oraz zgodność modelu z innymi teoriami, w tym z ogólną teorią względności. Dopuszczalne w zakresie teorii Wielkiego Wybuchu zostały poczynione w latach 90. XX wieku i na początku wieku XXI. Dzięki zaawansowanym teleskopom oraz danym z satelitów (COBE²⁷, WMAP²⁸) możliwe stały się pomiary o niespotykanej wcześniej precyzji, które doprowadziły m.in. do odkrycia, że tempo rozszerzania się wszechwiata wydaje się przyspieszać.

Przyjmując twierdzenie, że czas powstał wraz z wszechwiatem w momencie Wielkiego Wybuchu, prowadzi do przyjęcia modelu czasu - półprostej. Natomiast przyjęcie równie teorii końca wiata (Wielkiego Kresu), a wraz z nim i czasu, implikuje model czasu - odcinka. Do takich teorii należy m.in. teoria zakładająca, że wszechwiat skurczy się z powrotem do stanu z chwili Wielkiego Wybuchu (temperatura będzie wzrastać wraz ze wzrostem gęstości) i wtedy nastąpi koniec czasu oraz

²⁷ Zob. G. Smoot, K. Davidson: *Narodziny galaktyk*, tłum. P. Amsterdamski. Warszawa 1996. Książka ta jest m.in. zapisem historii projektu i badań prowadzonych przez COBE.

²⁸Komplet publikacji przedstawiających zebrane dane i omawiających rezultaty obserwacji prowadzonych przez sondę kosmiczną WMAP znajduje się w: „The Astrophysical Journal Supplement Series” 148 (2003) nr 1. W maju 2009 roku został wyniesiony na orbitę satelita Planck.

teoria zakładaj ca, e wszech wiat b dzie rozszerza si wiecznie, ale jego temperatura spada , a dojdzie do tzw. Wielkiego Chłodu²⁹.

Drugi argument za czasowym pocz tkiem wszech wiata opiera si na rozszerzeniu II prawa termodynamiki - w układzie termodynamicznie izolowanym entropia nigdy nie maleje i całkowita entropia dowolnego układu jest wi ksza lub równa sumie entropii jego cz ci³⁰ - na cało kosmosu. Zgodnie z II zasad termodynamiki w układach izolowanych entropia zwi ksza si z upływem czasu. Spadek entropii jest w tego rodzaju układach zakazany przez prawo fizyki, a zatem wzrost entropii jest nieodwracalny (w zwi zku z tym tak e czas jest nieodwracalny, anizotropowy). W argumencie tym, z zało enia ustawicznego wzrostu entropii we wszech wiecie (i uznania go za układ izolowany), wysuwa si perspektyw jego mierci cieplnej (to znaczy stanu, w którym cała energia i materia ulegnie równomiernemu rozproszeniu, na skutek czego ustanie mo liwo wyst pienia jakichkolwiek nieodwracalnych przemian termodynamicznych; entropia takiego wszech wiata byłaby wi c najwi ksza z mo liwych a czas przestałby płyn), by nast pnie z tej perspektywy wyprowadzi wniosek o pocz tku trwania czasowego wszech wiata. Gdyby bowiem zdarzenia dokonywały si w ci gu niesko czono go czasu nie maj cego pocz tku, ju dawno poszczególne formy energii ró ne od ciepła musiałyby doj do zamiany w równomiernie rozprzeznione we wszech wiecie ciepło. Energie poszczególnych ciał sko czone i st d w sko czonym czasie musiałyby doj do równowagi, czyli mierci cieplnej wszech wiata, a skoro jeszcze do tego nie doszło, to znaczy, e wszech wiat ma czasowy pocz tek³¹. Jest to tzw. argument entropologiczny implikuj cy model czasu - odcinka.

Hipoteza mierci cieplnej wszech wiata wywołała sprzeciw niektórych fizyków. L. Boltzmann i M. Smoluchowski sformułowali staty-

²⁹ Stanowiska w sprawie pocz tku i ewentualnego ko ca wiata opisane zostały m.in. w: S. W. Hawking: *Krótki historia czasu: od Wielkiego Wybuchu do Czarnych Dziur*, tłum. P. Amsterdamski. Warszawa 1990.

³⁰ Entropi nazywa si stopie wyrównywania si temperatury w cieplnych układach zamkni tych. Wzrost entropii w danym układzie oznacza zatem wzrost rozproszenia energii cieplnej.

³¹ Zob. H. Korpikiewicz: *Koncepcja wzrostu entropii a rozwój wiata*. Pozna 1998. s. 15-99.

styczn interpretacj termodynamiki stwierdzaj c , e w układzie izolowanym wzrost entropii jest o wiele bardziej prawdopodobny od jej spadku. Statystyczna interpretacja termodynamiki implikuje, e spadek entropii nie jest w układzie izolowanym zakazany przez prawo, zatem wzrost entropii jest odwracalny, w zwi zku z tym tak e czas jest odwracalny, izotropowy (jest to mo liwe, cho bardzo mało prawdopodobne). Ponadto termodynamika statystyczna zakłada, e ka de jednostkowe zjawisko w skali mikroskopowej, czyli w skali pojedynczych czstek, jest odwracalne³².

Obecnie przyjmuje si , e teoria mierci cieplnej wszech wiata jest nadinterpretacj . Zakłada si w niej bowiem, e wszech wiat jako cało jest układem izolowanym, co jest nieprawd , gdy rozszerzaj cy si wszech wiat jest układem otwartym. Pami ta równie trzeba o statystycznym charakterze prawa wzrostu entropii.

Podsumowuj c rozwa ania dotycz ce sko czono ci lub niesko czono ci czasu stwierdzi mo na, e teorie fizykalne implikuj czasowy poczek (i koniec) wszech wiata, a co za tym idzie sko czono czasu. Argumentem za tym jest teoria ekspansji przestrzennej wszech wiata. Natomiast na gruncie filozofii nauki nie ma zgodno ci, który z modeli czasu jest wła ciwy: czy czas jest sko czony, czy niesko czony. Nie wiemy te , jaki model b dzie implikowany przez zało enia przyj te na gruncie kwantowej teorii grawitacji.

Ostatnim pytaniem dotycz cym czasu, jakie zadamy, jest pytanie o kierunek jego upływu: czy czas jest linearny, czy rozgał ziony.

Czas nazywamy *linearnym (w lewo)*, je eli $\forall t_1, t_2, t_3 \in M,$

$$t_2 < t_1 \wedge t_3 < t_1 \rightarrow [(t_2 = t_3) \vee (t_3 < t_2) \vee (t_2 < t_3)],$$

Czas nazywamy *linearnym (w prawo)*, je eli $\forall t_1, t_2, t_3 \in M,$

$$t_1 < t_2 \wedge t_1 < t_3 \rightarrow [(t_2 = t_3) \vee (t_2 < t_3) \vee (t_3 < t_2)]^{33}.$$

Przyj ta na gruncie współczesnej fizyki i kosmologii definicja czasu wyklucza jego rozgał ziono . Zało enie to tkwi w procedurze koordy-

³² Zob. M. Gell-Mann, J. B. Hartle: *Time Symmetry and Asymmetry in Quantum Mechanics and Quantum Cosmology*, w: J. J. Halliwell et al.: *Physical Origins of Time Asymmetry*. Cambridge 1994. s. 311-345.

³³ Por. R. Klimek: *Wprowadzenie do logiki temporalnej*. s. 21; oraz K. Trz sicki: *Logika temporalna. Wybrane zagadnienia*, s. 86-87.

natyzacji czasu. Na gruncie fizyki i kosmologii zawsze przyjmowano, e czas jest linearny, spójny, nie rozszczepia si na dwie (lub wi cej) gał - zie ani w kierunku przeszło ci, ani w kierunku przyszło ci.

Modelu czasu rozgał zionego nie b d dokładnie omawia , gdy nie jest on przyjmowany na gruncie fizyki. Trzeba jednak zaznaczy , e model ten jest uznawany za konkurencyjny dla modelu czasu linearnego i rozwa any na gruncie np. filozofii.

Podsumowuj c dotychczasowe uwagi nale y stwierdzi , e istnieje kilka, niezgodnych ze sob , teorii dotycz cych czasu. Na gruncie fizyki nie ma zgodno ci co do niektórych jego własno ci. Za bezsporn mo na wła ciwie uzna jedynie lokaln linearno . Model linearny jest aktualnym modelem czasu przyjmowanym na gruncie fizyki. W zwi zku z powy szym stwierdzi mo na, e tezy adekwatnych systemów logiki temporalnej powinny wyra a przede wszystkim linearno czasu oraz przechodnio relacji wcze niej/pó niej. Za adekwatne mo na by równie uzna obecnie systemy wyra aj ce tak e ci gło i sko czono czasu.

IU. Prekursorem *tense logic* jest A. N. Prior. Zinterpretował on temporalnie funktory mo liwo ci i konieczno ci wprowadzaj c do skonstruowanych przez siebie systemów cztery funktory zdaniotwórcze od jednego argumentu zdaniowego, odpowiadaj ce w j zyku naturalnym ró - nym czasom gramatycznym:

Hp - było w przeszło ci zawsze tak, e p,

Gp - b dzie w przyszło ci zawsze tak, e p,

Pp - było w przeszło ci (kiedy) tak, e p,

Fp - b dzie w przyszło ci (kiedy) tak, e p³⁴.

Prior dał pierwsze zarysy rachunków oraz wyko czone systemy, w których wyst puj wymienione funktory czasowe. Do dnia dzisiejszego skonstruowanych zostało wiele systemów *tense logic*. Wi kszo z tych systemów powstała w latach 60. i 70. XX wieku. Obecnie tego rodzaju logika temporalna jest zaawansowana formalnie, ale nie jest ju rozwijaj c si dziedzin .

³⁴ Por. A. N. Prior: *Time and Modality*. Oxford: Clarendon Press 1957. s. 9-54. Funktory te mo na czyta tak e w nast puj cy sposób: F - mo liwe w przyszło ci, G - konieczne w przyszło ci, oraz P - mo liwe w przeszło ci, H - konieczne w przeszło ci.

Podstawowy system *tense logic* oznaczany jest symbolem K_t . Jego twórcą jest E. J. Lemmon, który swój system nazywał minimalnym. System ten określa podstawowe własności wprowadzonych przez Priora funktorów i jest niezależny od jakichkolwiek założeń dotyczących własności czasu (w K , relacja $<$ posiada dowolne własności). Aksjomatyzacja podstawowa nie narzuca nawet tego, że czas ma tworzyć porządek.

K_t jest rozszerzeniem klasycznego rachunku zdań. Zawiera zatem wszystkie aksjomaty tego rachunku:

A1. A , gdzie A jest tautologią klasycznego rachunku zdań.

Specyficznymi schematami aksjomatów systemu K_t są wyrażenia:

A2. $G(A \rightarrow B) \rightarrow (GA \rightarrow GB)$

A3. $H(A \rightarrow B) \rightarrow (HA \rightarrow HB)$

A4. $A \rightarrow HF A$

A5. $A \rightarrow GPA$

A6. GA , jeżeli A jest aksjomatem

A7. HA , jeżeli A jest aksjomatem³⁵.

Jak już podkreśliłam, system K_t jest niezależny od jakichkolwiek założeń dotyczących własności czasu. Systemy *tense logic* dla czasu o odpowiednich własnościach są rozszerzeniami systemu K_t ³⁶. Najprostszym rozszerzeniem systemu K_t jest system CR, nazywany inaczej systemem K_4 , skonstruowany przez N. B. Cocchiarell, który wyraża tylko przechodniość relacji poprzedzania $<$. Przez fakt, że CR wyraża tylko przechodniość tej relacji - jest on bazowym systemem nie tylko dla systemów czasu linearnego, ale także dla systemów czasu cyrkularnego i rozgałęzionego. Schematami aksjomatów systemu CR są wszystkie schematy systemu K_t (A1 - A7). Dodatkowo dochodzi aksjomat:

A8. $FFA \rightarrow FA$ (wyraża przechodniość relacji $<$).

³⁵ Znane są także inne aksjomatyki systemu K_t . Zob. A. N. Prior: *Past, Present and Future*. Oxford: Oxford University Press 1967. s. 176.

³⁶ Por. R. P. McArthur: *Tense Logic*. (Synthese Library. Vol. 111). Dordrecht - Boston: D. Reidel Publishing Company 1976, s. 17-51.

Linearne logiki temporalne (*linear tense logic*) wymagaj od relacji $<$ eby była ona przechodnia i dodatkowo spójna (sama przechodnio nie gwarantuje linearno ci). Wyra aj c podane wła ciwo ci relacji $<$ za pomoc aksjomatów, dochodzi si do systemu CL, tak e pochodzi tego od Cocchiarelli. Jest to system dla czasu linearnego, zwany *Logic of Linear Time*. Specyficznymi schematami aksjomatów systemu CL s schematy A1 - A8 (CR) oraz:

A9. $(FA \text{ a } FB) \rightarrow [F(A \text{ a } B) \vee F(A \text{ a } FB) \vee F(FA \text{ a } B)]$ (wyra a przyszł linearno relacji $<$: w prawo),

A10. $(PA \text{ a } PB) \rightarrow [P(A \text{ a } B) \vee P(A \text{ a } PB) \vee P(PA \text{ a } B)]$ (wyra a wstecz linearno relacji $<$: w lewo).

System CL został rozszerzony przez dodanie aksjomatów charakteryzuj cych nowe własno ci relacji poprzedzania. System dla czasu linearnego, gdzie relacja $<$ jest przechodnia, obustronnie linearna oraz pozbawiona momentu pocz tkowego (nieko cz ca si w przeszło ci) i ko cowego (nieko cz ca si w przyszło ci) skonstruował D. Scott. Rachunek ten oznacza si **SL**. Schematami aksjomatów w systemie SL s schematy A1 - A10 (CL) oraz:

Ali. GA \rightarrow FA (wyra a brak ostatniego momentu),

A12. HA \rightarrow PA (wyra a brak pocz tkowego momentu).

Rozszerzeniem systemu SL jest system **PL**. Autorem tego rachunku *tense logic* jest Prior. Jest to system dla czasu linearnego, w którym relacja $<$ jest przechodnia, obustronnie linearna, bez momentu pocz tkowego i ko cowego, a tak e g sta. Specyficznymi schematami aksjomatów rachunku PL s aksjomaty A1 - A12 (SL) oraz:

A13. FA \rightarrow FFA (wyra a g sto relacji $<$).

W *tense logic* skonstruowano tak e system dla czasu cyrkularnego, tzn. takiego, gdzie relacja $<$ jest przechodnia, zwrotna i symetryczna (czyli jest relacj równowa no ciow). Jest to system skonstruowany przez Priora, nazywany *Logic of Circular Time* i oznaczany przez PCr. Bazowym systemem dla *circular tense logic* jest system CR.

Specyficznymi schematami aksjomatów rachunku PCr s wymienione wcze niej schematy A1 - A8 (CR) oraz:

A14. GA \rightarrow A (wyra a zwrotno relacji $<$),

A15. GA \rightarrow HA (wyra a symetryczno relacji $<$).

System PCr jest najsilniejszym z przedstawionych systemów *tense logic*: zawiera w sobie wszystkie inne systemy. Na jego gruncie można udowodnić aksjomaty A9 - A13.

Obok systemów logicznych skonstruowanych dla czasu liniowego istnieją także systemy dla czasu rozgałęzionego, w których relacja $<$ jest przechodnia, ale nie jest spójna. Bazowym systemem *branching tense logic* jest, tak jak dla systemów dla czasu liniowego, system CR. W logikach czasu rozgałęzionego intuicyjnie chodzi raczej o to, że rozgałęzienie czasu się nie wyklucza, niż o to, że aksjomatycznie stwierdza się, że istnieją rozgałęzienia w czasie. W tym sensie system CR (a także K_t są logikami czasu rozgałęzionego, bowiem w ród modeli dla tych systemów występują zarówno modele, w których czas jest liniowy, jak i modele, w których czas jest rozgałęziony.

Systemem logiki dla czasu rozgałęzionego jest także system skonstruowany przez Reschera i Urquharta³⁷, oznaczany przez K_b i nazywany *Temporal Logic of Branching Time*. System ten wyraża przechodniość i wsteczność liniowo relacji $<$. Dopuszczalne jest tu zatem rozgałęzienie czasu w przyszłość. Schematami aksjomatów wymienionych wcześniej schematy A1-A8 (CR) oraz schemat A10 wyrażają wsteczność liniowo relacji $<$. Można więc rozszerzenia systemu K_b ³⁸.

Jak widać, skonstruowane systemy *tense logic* w pewien specyficzny sposób związane są z modelem czasu fizycznego. Zintegrowanie to miało miejsce dlatego, że analiza czasu gramatycznego implikuje przyjęcie jakiegoś modelu czasu fizycznego. Widać to m.in. w pracach Priora, który wychodząc z analiz czasu gramatycznego uzyskał wyniki pozwalające na dyskusję zagadnień fizycznych i filozoficznych. Systemy *tense logic* ustalają przede wszystkim znaczenie takich wyrażań jak: „czas jest liniowy”, „czas jest nieskończony”, „czas jest gęsty”, itp. Aksjomaty *tense logic* dotyczą charakteru czasowego następowania. Ich prawdziwość zależy od założeń fizyki i kosmologii dotyczących własności

³⁷ Zob. N. Rescher, A. Urquhart: *Temporal Logic*. New York: Springer 1971. Rozdział 4.

³⁸ Zob. R. P. McArthur: *Tense Logic*; i N. Rescher, A. Urquhart: *Temporal Logic*. Zostało udowodnione, że wszystkie wymienione systemy *tense logic* są pełne.

ci czasu³⁹. Aksjomaty i twierdzenia danego systemu temporalnego mog by prawdziwe w jednym modelu czasu, natomiast w innym mog by fałszywe.

IV. Powy ej przedstawiona została syntaktyczna charakterystyka najwa niejszych systemów *tense logic*⁴⁰; pokazane zostało, w jaki sposób, za pomoc aksjomatów, systemy te wyra aj niektóre własno ci czasu. Teraz podj ta zostanie próba odpowiedzi na pytanie o mo liwo zastosowania tych systemów na gruncie nauk przyrodniczych, głównie fizyki.

Wcze niej stwierdzone zostało, e system logiczny, a zwłaszcza jego j zyk, eby nadawał si do formalizowania niektórych tez danej dyscypliny naukowej, musi odpowiednio formalizowa pewne zwroty wyst - puj ce na jej gruncie. Warto ciowy system powinien równie dostarcza odpowiedniej aparatury inferencyjnej do odwzorowania niektórych niezawodnych rozumowa przeprowadzonych w j zyku danej nauki, na gruncie której system ten miałby znale zastosowanie. Systemy *tense logic* spełniałyby te warunki. Wyst puj w nich bowiem nieekstensjonalne funktry zdaniotwórcze zwi zane z poj ciami czasu: „było kiedy tak, e...”, „było zawsze tak, e...”, „b dzie kiedy tak, e ...”, „b dzie zawsze tak, e...”. Systemy *tense logic* ustalaj formalny sens wymienionych funktrów i umo liwiaj cisłe operowanie wyra eniami w ró - nych czasach gramatycznych w j zyku potocznym i w j zykach ró nych nauk. W zwi zku z tym mo na uzna , e adekwatne systemy *tense logic* dostarczyłyby j zyka cisłego, precyzyjnego i bardziej odpowiedniego ni j zyk potoczny do wyra ania tre ci niektórych twierdze fizyki współczesnej (wyra anych w j zyku wyobra eniowym) zwi zanych z czasem. Adekwatne systemy *tense logic* mogłyby tak e dostarcza od-

³⁹ Por. J. P. Burgess: *Logic and Time*. “The Journal of Symbolic Logic” 44 (1979). s. 566. Przykładowo, je eli z przesłanki „Zawsze b dzie tak, e p” wyprowadza si wniosek: „B dzie tak, e p” i chce uzna to wnioskowanie za poprawne, trzeba przyj , e czas nie ma ostatniego momentu. Podobnie, dla czasu traktowanego jako kontinuum koliste prawem odpowiedniej logiki *tense logic* jest wyra enie: Je eli p, to b dzie tak, e p”; wyra enie to nie b dzie prawem logiki dla modelu czasu - prostej.

⁴⁰ Mo na budowa tak e inne systemy dodaj c do systemów bazowych (głównie CR i CL) aksjomaty wyra aj ce takie własno ci relacji czasowego nast pstwa jak np. dyskretno , istnienie momentu pocz tkowego, istnienie momentu ko cowego. Istniej tak e systemy *tense logic* powstałe jako rozszerzenie rachunku kwantyfikatorów: QK , QCR, QCL itd.

powiedniej aparatury inferencyjnej do odwzorowania niezawodnych rozumowa, zawierających zdania w różnych czasach gramatycznych, przeprowadzonych na gruncie fizyki oraz filozofii nauki.

Posłuży pewnym prostym przykładem, który zobrazuje nam jednak możliwość wykorzystania języka systemów temporalnych w naukach przyrodniczych. Na gruncie fizyki występują m.in. prawa przyczynowe. Weźmy jedno z nich (a dokładniej jego egzemplifikację, pewien związek przyczynowy): *jeżeli jedna kula bilardowa uderza w drugą leżąca „swobodnie” na stole, wprawia ją w ruch*. Zwróćmy uwagę, że ten sam związek przyczynowy może być matematycznie różnie zapisany, gdyż można tu brać pod uwagę różne parametry będące nośnikami przyczyny i skutku: energii kinetycznej (przekazanie energii przez pierwszą kulę drugiej), lub pędu (utrata go przez pierwszą kulę, uzyskanie przez drugą). Stąd ten sam związek można zapisać za pomocą dwóch różnych wzorów matematycznych⁴¹. Natomiast formalizacja tego związku przyczynowego w obu przypadkach byłaby jednakowa. Prawa przyczynowe mają zawsze charakter jakościowy⁴². Tego rodzaju prawa są te niewątpliwie związane z czasem; przyczyna bowiem poprzedza w czasie skutek. Odpowiednia formalizacja tych praw w logice temporalnej powinna więc wyrażać zwłaszcza czasowe następstwo skutku po przyczynie. Na gruncie *tense logic* następstwo skutku po przyczynie można wyrazić w następujący sposób: $p \rightarrow Fq$, gdzie p reprezentuje zdanie opisujące przyczynę, w naszym przykładzie: *jedna kula bilardowa uderza w drugą leżącą „swobodnie” na stole*, a q zdanie opisujące skutek: *(kula) wprawia ją (drugą kulę) w ruch*. Funktor F odczytuje się: *będzie tak, e...*

Jak wiadomo, samo formalizowanie zwrotów występujących w języku danej nauki, w tym przypadku głównie fizyki, nie jest jednak wystarczającym warunkiem do zastosowania systemu logicznego na jej gruncie, jeżeli oczywiście ma on posiadać dla niej wartość poznawczą. Ustalone wcześniej zostało, że warunkiem zastosowania systemów logiki temporalnej w naukach przyrodniczych, głównie w fizyce, jest ade-

⁴¹ Por. W. Krajewski: *Zwiazek przyczynowy*. Warszawa 1967. s. 213-236.

⁴² Wzory matematyczne nie wyrażają praw przyczynowych, ale ilościowe zależności od przyczyny.

kwatne przedstawianie przez te systemy własności czasu fizykalnego i czasowej (wcześniej/później) relacji: specyficzne tezy adekwatnych systemów *tense logic* muszą być zdaniami prawdziwymi w fizykalnym modelu czasu. Przyjrzyj się zatem należy adekwatności przedstawionych wcześniej systemów.

System K_t nie nakłada na relację czasowego następstwa żadnych warunków. Jego aksjomaty są prawdziwe w każdym modelu czasu, a zatem także w modelu linearnym.

Aksjomatyka systemu CR nakłada na relację $<$ jedynie warunek przechodniości. Wobec tego można uznać, że system CR najprościej wyraża (za pomocą aksjomatu A8) własność z punktu widzenia nauk przyrodniczych relacji czasowych, jak jest relacja poprzedzania. Aksjomaty systemu CR również są prawdziwe w każdym modelu czasu.

Na gruncie systemu CL za pomocą aksjomatów można wyrazić obok przechodniości relacji $<$ również linearność czasu w prawo i w lewo (A9 i A10). Aksjomaty te są prawdziwe jedynie w modelu linearnym. System CL charakteryzuje ogólnie. Dzięki tej ogólności może być on uznany za logikę, za pomocą której można adekwatnie wyrazić podstawowe założenia nauk przyrodniczych, zwłaszcza fizyki, dotyczące czasu.

System PCr i K_b , a także SL i PL są obecnie nieadekwatne do współczesnych założeń nauk przyrodniczych odnoszących się do czasu. Na gruncie tych nauk nie jest bowiem przyjmowane, że czas jest cyrkularny (takie własności czasu za pomocą aksjomatów wyraża system PCr), ani rozgałęziony (co przyjmowane jest na gruncie systemów *branching tense logic*: m.in. K_b). Nie przyjmuje się też raczej, że czas jest nieskończony i w przeszłości i w przyszłości (takie warunki na relacji $<$ nakładają aksjomaty systemów SL i PL). Wymienione systemy, mimo że nie znajdują zastosowania na gruncie nauk przyrodniczych, to stanowią wartościowy materiał do badań metalogicznych.

Podsumowując rozważania przeprowadzone w niniejszym artykule stwierdzić można, że istnieje system *tense logic*, który spełnia warunki nakładane na systemy mogące mieć zastosowanie w naukach realnych. Odpowiednio formalizuje niektóre zwroty czasowe występujące w języku wyobraźniowym fizyki, a także adekwatnie wyraża (za pomocą

aksjomatów) należą własno relacji poprzedzania, przechodniości, oraz linearności czasu. Tym systemem jest system CL. Jego aksjomaty są zdaniami prawdziwymi w fizykalnym modelu czasu. System ten jest więc wartościowy poznawczo i mógłby znaleźć zastosowanie na gruncie nauk przyrodniczych, głównie fizyki i kosmologii. Jest w stanie dostarczyć tym naukom (oraz filozofii nauki) potrzebnych narzędzi, tj. odpowiedniego języka i aparatury inferencyjnej. Elementy ścisłego języka dobrze skonstruowanego i odpowiednio uytego systemu temporalnego mogą służyć do uściślenia i dokładnego, precyzyjnego komunikowania niektórych rezultatów poznania naukowego, związanych z czasem. Taki system temporalny może również dostarczyć środków do lepszego zrozumienia natury czasu. Różne poglądy filozoficzne, w tym tezy filozofii nauki, nie zawsze są precyzyjnie ujęte i jasno komunikowane. Wydaje się, że tak i na przeciw temu problemowi wychodzi odpowiedni system *tense logic*. W oparciu o adekwatną logikę można również rozstrzygnąć, które rozumowania wyrażone w języku uczasowionym są poprawne w zależności od odpowiednich założeń kosmologicznych.

Na zakończenie przypomnieć należy, że system logiczny jest wtedy adekwatny, gdy jest zgodny z historycznie zastanym stanem wiedzy. Adekwatność systemu logicznego nie ma zatem charakteru ostatecznego, gdyż ten stan wiedzy może ulec zmianie. Na gruncie fizyki współczesnej wciąż prowadzone są badania dotyczące czasu, prawdopodobne jest więc, że jego model fizykalny ulegnie zmianie (być może wraz z rozwojem fizyki kwantowej trzeba będzie przyjąć, na mikropoziomie rzeczywistości fizycznej, własności czasu, jak jest dyskretny). Obecnie fizycy poszukują również teorii kwantowej grawitacji (która połączyłaby teorię względności i mechanikę kwantową), jak na razie jednak pozostaje ona celem trudnym do osiągnięcia. Możliwe jest, iż teoria ta przyniesie jeszcze inne podejście do czasu i określi inne jego własności. Niewykluczony jest wpływ badań przyrodniczych na zmiany koncepcji czasu w filozofii nauki. W związku z tym pewne systemy temporalne mogą stracić zastosowania praktyczne, a inne zyskać. W takiej sytuacji należałoby ponownie zastanowić się nad adekwatnością niektórych systemów *tense logic* do przedstawiania własności czasu i relacji czasowej,

a tak e zwi zan z tym problemem mo liwo ci zastosowania tych systemów w naukach przyrodniczych.

Summary

The paper is devoted to the problem of possibility of application of some systems of tense logic in the natural sciences.

In the beginning of the paper there are given conditions imposed on formal systems which can be applied in the real sciences.

In the second part of the paper definition of physical time (and relation of preceding) are given. There are also briefly discussed the most important properties of physical time.

Third part of the paper presents a syntactic characterization of the systems of tense logic.

Finally, the last part of the paper seeks to answer whether the systems of tense logic adequate express, by means of theses, some properties of physical time and relation of temporal aftermath. What follows, whether they (especially their language) can find applications in the natural sciences, mainly in physics.

Key words: time, relation of preceding, tense logic, adequacy, application