

MAREK WOSZCZEK

Relacyjna mechanika kwantowa, uniwersalna zasada względności i podstawy fizyki

Konsekwentne ontologie relacyjne, zwłaszcza w kontekście filozofii przyrody, rzadko cieszyły się zainteresowaniem, głównie ze względu na dominującą w zachodniej filozofii pozycję kategorii „substancji”, „obiektu” i „rzeczy”, które charakterystykę relacyjną odsuwają na dalszy plan jako metafizycznie wtórna. Drugim istotnym powodem tego dystansu jest z pewnością bogactwo i zróżnicowanie relacji, jakie można analizować, co powoduje, że sam projekt formułowania ogólnej teorii relacji może wydawać się *prima facie* niewykonalny, przynajmniej w analitycznym rygorze: każda fundamentalna ontologia przyrody powinna wyróżniać pewną relację lub klasę relacji, które pełniłyby rolę fundującą (optymalnie jako baza superwencji) dla wszystkich pozostałych. Dopiero sformułowanie i ewolucja podejść strukturalistycznych w XX wieku, zwłaszcza w matematyce (począwszy na szkole Bourbaki w latach 30.) i filozofii matematyki oraz w kontekście rozwoju matematycznej teorii kategorii, przyczyniły się do szerszego zainteresowania metafizyką relacji jako atrakcyjną opcją¹.

¹ Wynika to stąd, iż w teorii kategorii nie rozpatruje się – jak w teorii mnogości – zbiorów danych elementów z odpowiednimi relacjami na nich, lecz raczej zestawy pierwotnych przekształceń (morfizmów/strzałek) dowolnych obiektów, na które nałożone są odpowiednie ograniczenia definiujące ogólną strukturę: to przesunięcie znacząco zmienia też charakter kategorijsko konstruowanych teorii fizycznych (zob. np. Zafiris, Mallios, 2007). Na temat strukturalizmu we współczesnej filozofii matematyki zob. przede wszystkim: Reck, Price,

Decydującym impulsem był rozwój fizyki teoretycznej związany ze sformułowaniem szczególnej i ogólnej teorii względności (dalej: STW i OTW), mechaniki kwantowej (QM) oraz kwantowej teorii pola, które są nie tylko zdecydowanie antysubstancjalistyczne „w duchu” (co można podważać, ignorując na przykład kontekst ich formułowania oraz dominujące interpretacje), ale same ich formalizmy na różne sposoby nie tyle utrudniają, co często wręcz uniemożliwiają konstruowanie interpretacji postulujących bazowe czasoprzestrzenne obiekty czy w ogóle rozróżnialne indywidua. Mówiąc ogólnie, rozwój fizyki fundamentalnej stawia pluralistycznych substancjalistów, w szczególności reistów, w wyjątkowo trudnej sytuacji, z której nie ma wyjścia bez sporej dozy filozoficznego separatyzmu, a czasem arbitralnego naruszania konstrukcji samych teorii (nie tylko ich „ducha”).

W tej sytuacji zainteresowanie strukturalistyczno-relacyjnymi podejściami w mikrofizyce jest całkiem naturalne, ponieważ wraz z rozwojem samej QM (zwłaszcza kwantowej teorii informacji) oraz podejść kategorijskich w fizyce teoretycznej pojawiają się nowe perspektywy i możliwości ogólniejszego formułowania problemów z zakresu ontologii fizyki. W przypadku ontologii QM problemy te można w zasadzie pogrupować w cztery kompleksy permanentnie pojawiających się, ściśle powiązanych ze sobą kontrowersji:

(1) Czym jest *stan kwantowy* reprezentowany zespoloną funkcją falową, wektorem w ośrodkowej przestrzeni Hilberta albo liniowym funkcjonałem na pewnej C^* -algebrze? Czy można mówić o „kwantowej przestrzeni fazowej”, a jeśli tak, to jak interpretować ją fizycznie?

(2) Czym są/jak należy interpretować *prawdopodobieństwa* w QM? Czy rzeczywiście QM jest teorią ontologicznie indeterministyczną?

(3) Czym jest *dynamika kwantowa*, jak należy fizycznie rozumieć unitarność i czy jest ona łamana przez obiektywny proces „redukcji stanu”, co powoduje nieodwracalną utratę informacji w świecie fizycznym (łamię

2000, oraz Resnik, 1997 i Bondecka-Krzykowska, 2007. Na temat strukturalistycznych fundamentów teorii kategorii: Awodey, 1996; McLarty, 2004. Na temat historycznych związków szkoły i programu Bourbaki z ogólniejszym zwrotem strukturalistycznym por. interesujący artykuł Davida Aubina: Aubin, 1997.

zasadę zachowania informacji)? Czy *czas* w QM jest rzeczywiście „czasem klasycznym” (mechaniki klasycznej) i czy mamy wierzyć w jego kwantową asymetrię (anizotropię)?

(4) Jak należy rozumieć *kwantowe korelacje stanów* i czym jest *splątanie kwantowe* jako zupełnie nowy (nieklasyczny) rezerwuar informacji fizycznej?

Konsekwentne relacyjne podejście do QM, jak wszystkie inne rozbudowane interpretacje QM, proponuje kilka podstawowych rozstrzygnięć wyjściowych, które motywowane są analizą tzw. „paradoksów kwantowych” oraz matematycznej struktury samej teorii. Te pierwsze są oczywiście „paradoksami” *a posteriori* – analogicznie do „paradoksów relatywistycznych”, to znaczy w analogii do mechaniki klasycznej i OTW – ponieważ nie jest możliwe pełne ich wyeliminowanie poprzez skonstruowanie modelu czysto klasycznego (bez deformacji kwantowych i wprowadzania dodatkowych, nieklasycznych zasad). Oznacza to, że pomimo podobieństw QM nie jest nawet teorią *quasi*-klasyczną i niosą one, jak każde paradoksy fizyczne, niesłychanie istotne wskazówki. Z kolei liniowa struktura QM jest matematycznie bardzo „sztywna”, nie dopuszcza żadnych istotniejszych zmian w formalizmie bez jego zniszczenia, co sprawiłoby, że teoria natychmiast przestaje działać poprawnie, co jest w szczególności problemem wszelkich wersji QM próbujących włączyć w aksjomatykę teorii nieliniowość. W sensie filozoficznym można zatem wybrać, obok konserwatywnej (interpretacja kopenhaska), strategię „ikonoklastyczną” (najrzadszą), zrywając z obecnym kształtem QM, postulując jej daleko idącą nieadekwatność, co wymaga proponowania teorii nowej i skuteczniejszej (przewidującej nowe efekty fizyczne, np. grawitacyjny kolaps superpozycji kwantowej); „ptolemejską”, polegającą na uzupełnianiu QM o dobrane *ad hoc* parametry ukryte i komplikowaniu jej formalizmu oraz fizycznej interpretacji w celu ich maksymalnego dostosowania do przyjętych założeń (fizycznych i filozoficznych) wcześniejszych teorii klasycznych; albo „einsteinowską”, również konstruktywną, ale szukającą nowych, *fundamentalnych zasad organizujących*, eliminujących „paradoksy” przez rezygnację z kluczowych założeń klasycznych, a także wyjaśniających fizyczną adekwatność oraz specyfikę QM. Relacyjne podejście do QM, inspirowane

kwantową teorią informacji, mieści się w ostatniej z tych strategii [Rovelli, 1996]², najlepiej zatem rozpocząć od lokalizacji kluczowych „paradoksów”, które wywołują konfuzję.

Relacyjne stany kwantowe i konteksty Bohra

Silną nieklasycyzność QM można demonstrować nie tylko na przykładzie samych korelacji dla stanów splątanych, takich jak stany GHZ i ich uogólnienia, ale przede wszystkim przy użyciu nietrywialnych procedur eksperymentalnych, wykorzystujących charakterystyczne właściwości tego splątania. Jedną z nich jest zrealizowana ostatnio laboratoryjnie procedura wymiany splątania z opóźnionym wyborem, którą w 2000 r. zaproponował Asher Peres ([Peres, 2000], zob. także [Brukner, Aspelmeyer, Zeilinger, 2005])³ i która precyzyjnie ukazuje stopień, w jakim globalne właściwości kwantowe układu silnie odbiegają od jego klasycznego (separowalnego) odpowiednika. Jednocześnie ujawnia ona – jak podobne eksperymenty z opóźnionym wyborem – głęboko nieintuicyjne („paradoksalne”) własności operacji kwantowych, sprzeczne z klasycznym obrazem przyczynowości i czasu, co ma kluczowe znaczenie we wszystkich programach konstruowania kwantowej teorii grawitacji (nie tylko tych opartych na kwantowaniu kanonicznym). Doświadczenie wykonał w 2012 r. zespół z Institute for Quantum Optics and Quantum Information Austriackiej Akademii Nauk i zgodnie z wyjściowym eksperymentem myślowym Peresa łączy dwa schematy doświadczalne (protokoły), wymiany splątania oraz opóźnionego

² Rovelli klarownie przedstawia motywacje relacyjnego podejścia do QM jako wytyczne: należy (1) określić zestaw prostych założeń fizycznych dotyczących świata, przedstawionych jako postulaty QM mocno osadzone w kontekście eksperymentalnym (kwantowa teoria informacji); (2) dokonać analizy konsekwencji tych postulatów, w szczególności precyzyjnie ustalić, które z nich i w jaki sposób naruszają standardowe (intuicyjne) przekonania dotyczące świata fizycznego; (3) wyprowadzić cały formalizm QM z tych prostych założeń. Jest to modelowo konstruktywna strategia „einsteinowska” (w analogii do STW), co podkreśla sam Rovelli.

³ Podobny efekt wytwarzania splątania przez postselekcję na ansamblach w mieszanym, separowalnym stanie analizował Oliver Cohen w: Cohen, 1999.

wyboru [Ma, Zotter et al., 2012]⁴. Są one o tyle interesujące, że stanowią radykalizację idei, które pojawiły się w trakcie dyskusji teoretycznych lat 30., zaś dziś stanowią część technologii informacyjnych. Najkrócej można scharakteryzować to doświadczenie jako połączenie protokołu opóźnionego wyboru (J.A. Wheeler) z testem Bohrowskiej, kwantowej komplementarności uogólnionej do dualizmu splątania-separowalności.

Zestaw eksperymentalny, w największym uproszczeniu, składa się tutaj z dwóch niezależnych źródeł, EPR I i EPR II, produkujących dwie splątane pary fotonów w antysymetrycznych stanach polaryzacyjnych, $\psi_{\alpha\beta\text{EPR}}$ oraz $\psi_{\gamma\delta\text{EPR}}$ (fotony oznaczone ‘ α ’ i ‘ β ’ wytworzone przez źródło EPR I, oraz fotony ‘ γ ’ i ‘ δ ’ przez źródło EPR II), tak że całość opisana jest separowalnym stanem $\psi_{\alpha\beta\text{EPR}} \otimes \psi_{\gamma\delta\text{EPR}}$. Pary te są następnie rozdzielane: na fotonach ‘ α ’ i ‘ δ ’ dokonywane są (przez Alicję i Bogdana) pomiary polaryzacji w jednej z losowo wybranych baz (polaryzacja pozioma/pionowa, superponowana dodatnia/ujemna lub kołowa prawo-/lewoskrętna), zaś fotony ‘ β ’ i ‘ γ ’ przesyłane są długim światłowodem do Wiktora, który dokonuje na nich jednego z dwóch, również losowo wybranych typów pomiaru: mierzy je albo jako stany separowalne, $\psi_{\beta} \otimes \psi_{\gamma}$, albo na drodze tzw. pomiaru Bella⁵ jako splątane stany Bella, $\psi_{\beta\gamma\text{Bell}}$. Układ eksperymentalny jest tak zbudowany, by podczas dokonywania pomiarów niemożliwa była ze względu na ograniczenia relatywistyczne fizyczna komunikacja między Alicją i Bogdanem, zaś pomiary Wiktora przebiegały zawsze już po dokonaniu i zarejestrowaniu odpowiednich wyników dla fotonów ‘ α ’ i ‘ δ ’ (w układzie odniesienia laboratorium). Następnie wyniki Alicji i Bogdana porównywane są z wynikami Wiktora w taki sposób, że możliwa jest ich segregacja na cztery podzbiory, ze względu na to, czy Wiktor mierzył stan $\psi_{\beta} \otimes \psi_{\gamma}$ czy $\psi_{\beta\gamma\text{Bell}}$, a także jaki był wynik, s^{\pm} . Okazuje się, że w idealnej zgodności z przewidywaniami QM zachodzą dwa rozłączne

⁴ Pierwszej pełnej doświadczalnej wymiany splątania na źródłach niewymagających zadnej synchronizacji dokonał zespół z Uniwersytetu w Genewie, zob. Halder, Beveratos et al., 2007.

⁵ Pomiar Bella to jedna z podstawowych operacji informacyjno-kwantowych, polegająca na łącznym pomiarze dwóch kubitów, co powoduje ich zrzutowanie na stan Bella, czyli ich kwantowe splątanie.

przypadki. Pierwszy zrealizowany jest w sytuacji, gdy Wiktor mierzy stan pary ‘ β ’ i ‘ γ ’ jako układ separowalny: wówczas korelacje między wynikami Alicji i Bogdana wskazują, iż fotony ‘ α ’ i ‘ δ ’ opisane są stanem w pełni separowalnym, $\psi_\alpha \otimes \psi_\delta$, a więc zachowane jest splątanie par opisane wyjściowo stanem $\psi_{\alpha\beta\text{EPR}} \otimes \psi_{\gamma\delta\text{EPR}}$, źródła EPR I i II są w pełni niezależne fizycznie. Drugi przypadek jest jednak całkowicie kontrintuicyjny, niezależnie od samego problemu splątania fotonów: jeśli Wiktor mierzy stan pary ‘ β ’ i ‘ γ ’ jako stan Bella $\psi_{\beta\gamma\text{Bell}}$, wówczas analiza posegregowanych wyników Alicji i Bogdana wskazuje, iż nie istnieje już fizyczna korelacja między fotonami ‘ α ’ i ‘ β ’ oraz ‘ γ ’ i ‘ δ ’ reprezentowana stanem $\psi_{\alpha\beta\text{EPR}} \otimes \psi_{\gamma\delta\text{EPR}}$, lecz splątanie to zostało – jak zwykle się mówić – „wymazane” oraz „wymienione” (*swapped*) na nowe splątanie dane stanem $\psi_{\alpha\delta\text{EPR}} \otimes \psi_{\beta\gamma\text{EPR}}$, mimo iż cząstki ‘ α ’ i ‘ δ ’ nigdy w przeszłości nie oddziaływały na siebie fizycznie. Co więcej, nie tylko samo splątanie, ale nawet stopień tego splątania dla $\psi_{\alpha\delta}$, dany odpowiednią miarą, zależy od ilości informacji, jakie uzyskał Wiktor, dokonując rzutowania stanu pary $\beta + \gamma$ na stan częściowo splątany. Wynika to z fundamentalnej właściwości kwantowej informacji zwanej monogamicznością splątania, która mówi, iż dla układów kwantowych znajdujących się w stanie maksymalnie splątanych nie jest możliwe ich jednoczesne splątanie z jakimkolwiek innym układem (innymi słowy, jeśli maksymalnie splątane są dwa kubity, wówczas nie istnieje ich jednoczesne splątanie z jakimkolwiek innym kubitami). Warunek tej monogamiczności w ogólnej postaci dla wszelkich stanów splątanych wyraża szczególna nierówność, zwana nierównością CKW, Coffmana–Kundu–Wootersa. Jeśli stan pary $\beta + \gamma$ nie będzie splątany maksymalnie, wówczas również stan pary $\alpha + \delta$ będzie splątany częściowo, co można wyrazić ilościowo za pomocą odpowiedniej miary komplementarności [Brukner et al., 2005, s. 1917 i nast.].

Sytuacja realnie komplikuje się nie w nierelatywistycznym przybliżeniu, lecz dla obserwatorów w zakrzywionej czasoprzestrzeni, nawet inercjalnych, gdyż na stopień splątania wpływa struktura tej czasoprzestrzeni i jej dynamika (na przykład sam ekspandujący Wszechświat generuje dodatkowe stany splątane pól kwantowych, które prawdopodobnie można

nawet wykorzystać do ustalania pewnych kosmologicznych parametrów) [Alsing, Fuentes-Schuller et al., 2006]. W przypadku obecności silnych pól grawitacyjnych i przyspieszających obserwatorów z oddzielającymi ich horyzontami informacyjnymi splątanie nie jest zachowane (maleje w związku z termalizacją stanu kwantowego próżni, choć nigdy do zera), a obserwatorzy ci będą się różnić w jego ocenie, a więc jest ono względne w nieinercjalnych układach odniesienia⁶. Ponieważ kwantyzacja pola jest odmienna dla różnych nieinercjalnych obserwatorów w ich klinach rindlerowskich, promieniowanie Daviesa-Unruha w jednym z nich wytwarza dodatkowe niekontrolowane splątanie, co ma ogromne znaczenie w przypadku układów rozdzielonych horyzontem osobliwości – sugeruje to głęboki związek między grawitacją i splątaniem kwantowym. Możliwe jest także eksperymentalne testowanie fizycznej zasady względności w obszarze, gdzie jednocześnie powinny występować efekty kwantowe oraz grawitacyjne. Propozycje pierwszych testów tego typu dotyczą pojedynczych cząstek w stanie superpozycji kwantowej umieszczonych w polu grawitacyjnym, których kwantowo ewoluujące stopnie swobody mogą być użyte do zdefiniowania funkcji czasu własnego układu [Zych, Costa et al., 2012; Zych, Costa et al., 2011]⁷. Takie eksperymenty mają fundamentalne znaczenie daleko wybiegające poza samo testowanie QM w bardziej wyrafinowanych warunkach (prawie wszystkie laboratoryjne doświadczenia na prostych układach kwantowych, takich jak fotony, przeprowadzane są przy założeniu lokalnego tła w postaci płaskiej czasoprzestrzeni), gdyż sama ogólna zasada względności ma głębokie konsekwencje, naruszające wszystkie podstawowe intuicje fizyki newtonowskiej. Przykładowo, choć w STW możemy

⁶ Zob. np. Alsing, Milburn, 2003; Alsing, McMahon, Milburn, 2004 (dla przypadku kwantowej teleportacji).

⁷ Możliwe jest umieszczenie układu kwantowego, takiego jak foton albo masywna cząstka, w stanie superpozycji kwantowej na dwóch różnych poziomach potencjału grawitacyjnego (w jednorodnym polu grawitacyjnym) i zbadanie zachowania interferencyjnego takiego jednocząstkowego „zegara” w zależności od tego, czy dostępna jest informacja o przebytej drodze (w oparciu o czas dotarcia do detektora i grawitacyjny efekt dylatacji czasu). W takim przypadku wyjaśnienie przesunięcia fazy i redukcji widoczności interferencji wymaga *łącznego* zastosowania ogólnej zasady względności i kwantowej zasady komplementarności (analiza mechaniki układu w płaskiej czasoprzestrzeni nie wystarczy).

jeszcze mówić o względnych prędkościach różnych układów, na przykład cząstek, o tyle w OTW, ściśle rzecz biorąc, nawet to jest problematyczne, co wynika z elementarnej geometrii przesunięcia równoległego wektorów w zakrzywionej przestrzeni riemannowskiej – powiedzenie, że „dwie cząstki mają tę samą prędkość”, nie jest dwuznaczne tylko wtedy, gdyby cząstki te miały tę samą (lub nieskończenie bliską) lokalizację czasoprzestrzenną⁸. Jednocześnie punkty czasoprzestrzeni nie mają żadnej operacyjnej, dynamicznej definicji ani immanentnego, fizycznego sensu (relacyjna lokalizacja jest *jedynie* cechowaniem), dlatego błędne jest mówienie o „czasoprzestrzennej lokalizacji” zdarzenia albo o jakimkolwiek „położeniu w czasoprzestrzeni”. OTW, ogólnie kowariantna, deterministyczna teoria z cechowaniem, radykalizuje zasadę względności i niezmienniczości pod cechowaniem, tak że również pojęcie absolutnego czasu i samego „upływu czasu”, tracą fizyczny sens (np. [Petkov, 2009]), a więc, co nie dziwi, nierelatywistyczne sformułowanie QM (NRQM) nie może działać w pełni poprawnie – generuje fizyczne paradoksy – o ile nie zostanie uwzględnione odpowiednie uogólnienie zasady względności, co na jeszcze głębszym poziomie eliminuje podstawowe intuicje klasycznej mechaniki. Ponieważ sama optyka kwantowa ze względu na rosnącą precyzję układów pomiarowych zbliża się do reżimu laboratoryjnego testowania efektów kwantowo-grawitacyjnych (np. Ali, Das, Vagenas, 2011; Pikovski, Vanner et al., 2012; Bekenstein, 2012; Berchera et al., 2013), zrozumienie, jak działa w nim ta uogólniona zasada względności ma podstawowe znaczenie.

Powyższy opis eksperymentu z opóźnionym wyborem oraz wyników uzyskanych w jego poszczególnych wariantach sprawia wrażenie głęboko paradoksalnego i z pewnością nie jest możliwe ich wyjaśnienie przez odwołanie do jakiegokolwiek teorii *quasi*-klasycznej (nawet gdyby była to QM z pewnymi niekontekstualnymi, tj. klasycznymi, ukrytymi zmiennymi – ukrytymi stanami fizycznymi bez dyspersji, nie mówiąc już o asymetrii samego czasu). „Paradoksalność” ta ma kilka przyczyn, ale – analogicznie

⁸ Z tego samego powodu nie ma sensu mówienie w OTW nawet o układach inercjalnych, które są definiowane przez pole spoczywających względem siebie lokalnych zegarów. W OTW z krzywizną riemannowską takie pole nie da się jednoznacznie zdefiniować, więc nawet to podstawowe pojęcie przestaje być użyteczne.

do fizyki relatywistycznej – wynika z kilku wyjściowych „naturalnych” założeń, które można jednak po dokładniejszej analizie zakwestionować. Problem, jak w przypadku „paradoksów” relatywistycznych referowanych z newtonowskiego punktu widzenia przy porównywaniu różnych układów odniesienia, leży w dużej mierze w samym sposobie, w jaki przedstawiony (opisany) jest powyższy eksperyment, co sprawia, że w prawie beznadziejny sposób pomieszane są kategorie kwantowe z klasycznymi.

(I) Po pierwsze, u podstaw całego rozumowania leży klasyczna nie-kontekstualność, przekonanie, że zawsze *istnieje pewien wyróżniony, obiektywny opis całej sekwencji zdarzeń kwantowych*, albo, innymi słowy, istnieje *a priori* (niekoniecznie w sensie fizyczno-operacyjnym czy realnie) pewien postulowany absolutny obserwator lub układ odniesienia, który umożliwi określenie, jaki jest w każdej chwili t *obiektywny stan ψ* każdego układu (na tym też opiera się całe rozumowanie prowadzące do tzw. „paradoksu EPR”). Z założenia tego – oraz przekonania (II) – wprost wynika również twierdzenie, iż poszczególne wyniki pomiarów można w tym absolutnym układzie klasycznie porównać i *skonstruować jednolitą, klasyczną historię całego eksperymentu* jako „widok znikąd” (*view from nowhere*). Aby w pełni uświadomić sobie, jak mocne jest to założenie i dlaczego natychmiast prowadzi do głębokich paradoksów w rozumieniu QM, należy zwrócić uwagę na jego dwa ważne komponenty, które nie zawsze są jasno wypowiedziane przy formułowaniu interpretacji takich „paradoksów” jak powyższy:

(I.1) *postulat Świata Klasycznego*⁹ jako fizycznego tła dla procesów kwantowych („kwantowe procesy w klasycznym świecie”): przy formułowaniu paradoksu interpretatorzy nieustannie zakładają wyobrażenie tego tła jako punktu odniesienia dla procesów kwantowego pomiaru i porównywania wyników, analogicznie do mimowolnego i błędnego zakładania absolutnej czasoprzestrzeni dla STW i OTW;

⁹ Postulat ten, nazwany tak przez nawiązanie do *Postulat der absoluten Welt* Hermanna Minkowskiego [Minkowski, 1909, s. 7], można nazwać również *postulatem Absolutnego Obserwatora*, klasycznego superobserwatora, którego opis jest całkowicie niekontekstualny – są one dokładnie równoważne.

(I.2) *postulat absolutnego (niekontekstualnego i nierelacyjnego) stanu fizycznego* układu, traktowanego jako *obiektywny fakt* dotyczący tego układu, niezależnie od jego interakcji i relacji z innymi układami – dotyczy to szczególnie „kolapsu funkcji falowej”, który w tym wyobrażeniu powoduje, że wyjściowy stan kwantowy ma automatycznie „stawać się” obiektywnym stanem klasycznym; czyli, ujmując to epistemologicznie:

(I.2') postulat *absolutnych wartości prawdziwościowych* zdań o stanach fizycznych układów: opis stanu fizycznego (dany np. funkcjami ψ_α , $\psi_\beta \otimes \psi_\gamma$ czy $\psi_{\beta\gamma\text{Bell}}$), a także zdania o zmierzonych wartościach obserwabli, np. polaryzacji fotonu s^\pm , są obiektywnie prawdziwe dla wszystkich fizycznych, lokalnych obserwatorów, dlatego i tylko dlatego „opisują oni tę samą rzeczywistość”.

(II) Po drugie, zakłada się wyróżniony klasyczny sektor zestawiania informacji, to znaczy dopuszcza się, że *elementarny przekaz informacji (interakcja fizyczna) może być, przynajmniej na pewnym etapie, w pełni klasyczny*, czyli, innymi słowy, *możliwe jest na jakimkolwiek etapie całkowicie klasyczne porównanie informacji o stanach kwantowych*. Ten osobliwy dualizm kwantowo-klasyczny, wynikający najczęściej z arbitralnego ustalenia kanonicznego cięcia Bohra i (I.1), prowadzi do przeświadczenia, iż uzyskana przez układ A informacja o stanie kwantowym pewnego układu α może być następnie klasycznie przetwarzana, w szczególności swobodnie zestawiana przez układ A z informacją o α , którą ma inny układ B – możliwość takiego porównywania ma jednocześnie uprawomocnić postulat (I).

(III) Po trzecie, mimowolnie wprowadza się absolutne, asymetryczne tło czasowe, to znaczy zakłada się, że *cała analiza stanów fizycznych wymaga ortonormalnie płynącego czasu z absolutnie zdefiniowanymi relacjami „wcześniej”/„później” oraz obiektywnymi, ontycznymi prawdopodobieństwami gwarantującymi ten upływ*. Innymi słowy zakłada się, w ścisłym związku z (I.1), iż obiektywne, pierwotne relacje czasowe mogą służyć do uporządkowania historii całego eksperymentu niezależnie od kwantowych stanów układów-obszerników oraz ich interakcji¹⁰. Po-

¹⁰ Krótkie przedstawienie i krytyka takich strategii (a także filozoficznych nadziei na uratowanie ontologicznego prezentyzmu) np. w: Callender, 2008.

nieważ wyobrażenie to traktuje sam „upływ czasu” jako tło odniesienia, to wraz z przyjęciem (I.1), (I.2) i (II), tj. obiektywistyczną interpretacją takich stanów jak $\psi_{\alpha\beta\text{EPR}} \otimes \psi_{\gamma\delta\text{EPR}}$, $\psi_{\alpha\delta\text{EPR}} \otimes \psi_{\beta\gamma\text{EPR}}$ oraz eigenwartości s^{\pm} , prowadzi ono do rażącego paradoksu czasowo-przyczynowego, powoduje ostry konflikt z STW (przestrzennopodobna nielokalność) i konieczne jest mówienie o wstecznym „wymazywaniu” i „wymienianiu” splątania. To założenie powiązane jest bardzo głęboko z prezentystycznym i antropocentrycznym wyobrażeniem „pomiaru” z NRQM, traktowanym jako pojęcie pierwotne: pomiar wartości ma być sprzężony z domniemanym „stawianiem się” trójwymiarowych obiektów w czasie. Jest to jednak typowy artefakt NRQM jako mechaniki w rozszczepionej 3+1-czasoprzestrzeni \mathbf{M} , co generuje pseudoproblemy związane z wyróżnionymi foliacjami \mathbf{M} i jest metodologicznie bezużyteczne w kosmologii kwantowej (por. np. [Hartle, 1995; 2006]). Najkrócej mówiąc, wyróżnieni obserwatorzy wymagają tu wyróżnionych pomiarów w wyróżnionej teraźniejszości.

Relacyjne podejście do QM¹¹ i relacyjna analiza takich eksperymentów jak wymiana splątania opiera się na odrzuceniu wszystkich tych założeń, co w szczególności wynika z całkowitego zakwestionowania postulatu (I.1) – założenia te uznaje się po prostu za fałszywe jako przejaw „klasycznego szowinizmu” (*classical chauvinism*)¹² w interpretacji teorii kwantowej. Carlo Rovelli podkreśla w tym kontekście bezpośrednią analogię z „newtonowskim szowinizmem”, który uniemożliwia pełną akceptację fizycznych konsekwencji OTW (np. przez postulowanie wyróżnionej foliacji czasoprzestrzeni) – w przypadku QM paradoksy, wynikające z rozumowań opartych na błędnych założeniach, są o wiele bardziej uderzające. Najkrócej rzecz ujmując, odrzucenie wszystkich tych postulatów w podejściu relacyjnym jest konsekwencją dwóch rozstrzygnięć teoretycznych:

(R1) odrzucenia postulatu Świata Klasycznego, a więc konsekwentnego zastosowania reguł i algorytmu QM do opisu każdej fundamentalnej

¹¹ Relacyjny program dla QM sformułował Carlo Rovelli: Rovelli, 1996; 2005a, s. 209–221; 2005b; zob. też Smerlak, Rovelli, 2007. Więcej szczegółów i dyskusja w: Brown, 2009; van Fraassen, 2010; Woszczek, 2010, s. 211–248; Woszczek, 2015, s. 211–252.

¹² Trafne określenie, którego użył w swoim wykładzie Ioannis Raptis podczas 5th International Quantum Structures Association Conference (Cesena, Włochy, 31 III – 5 IV 2001).

interakcji fizycznej (wymiany informacji) oraz uznania kwantowego transferu informacji za fizycznie podstawowy, co oznacza, że żadna teoria fundamentalna nie może wprowadzać do podstaw fizyki klasycznego sektora zestawiania informacji;

(R2) *przyjęcia uogólnionej, uniwersalnej zasady względności*, a więc jej rozciągnięcia na odpowiedni dla 4-czasoprzestrzeni, kwantowy opis stanu fizycznego układów.

Akceptacja (R1) i (R2), swego rodzaju ontologiczna radykalizacja poglądów Bohra, Heisenberga i Pauliego, ma daleko idące konsekwencje teoretyczne dla fizyki fundamentalnej i nie tylko nie wymaga modyfikacji teorii kwantowej w żadnym szczególe, ale sprawia, że wspomniane „paradoksy” kwantowe przestają nimi być. Analizując eksperyment wymiany splątania z opóźnionym wyborem konsekwentnie relacyjnie, musimy zauważyć, że już sam sposób jego przedstawiania generuje wrażenie paradoksalności wskutek mimowolnego angażowania założeń (I)-(III), a więc takiego referowania przebiegu eksperymentu, jak gdyby procesy mikrofizyczne można było zrekonstruować niekontekstualnie przez odwołanie do apriorycznego, klasycznego tła (ontycznej sceny fizyki przedkwantowej). Jest to zapewne odwrócona postać specyficznego „fizycznego kantyztu”, którego stulecie temu bronił w przemyślanej wersji Niels Bohr, stwierdzając, że „świat kwantowy nie istnieje”¹³. O ile wypowiedź Bohra miała charakter epistemologiczny (takie były przynajmniej jego motywacje), o tyle ontologizacja takiego poddanego inwersji „kantyztu”, całkowicie wbrew filozofii i intencjom Bohra, prowadzi do beznadziejnego pomieszania kategorii teoretycznych, ekwiwokacji i zamieszania interpretacyjnego:

¹³ Cyt za: Petersen, 1963, s. 12: „Świat kwantowy nie istnieje. Jest tylko abstrakcyjny, kwantowy opis fizyczny”. Ta wypowiedź Bohra często jest rozumiana jako metafizyczne stwierdzenie, iż „istnieje tylko świat klasyczny” albo jako dualistyczny postulat Świata Klasycznego – „tła procesów kwantowych” (= postulat I.1), ale są to interpretacje nie do przyjęcia, ponieważ kolidują z innymi tezami Bohra, który nie wprowadzał żadnego fizycznego lub ontologicznego oddzielenia świata klasycznego i kwantowego (wszystkie przyrządy pomiarowe również są układami atomowo-kwantowymi). Zdanie to, zgodnie z intencjami Bohra, należy rozumieć jako złamanie założenia I.2, ideału fizyki klasycznej: QM ma za przedmiot interakcje między układami, a nie nieistniejące monadyczne fakty-„stany rzeczywistości” poza tymi interakcjami, a więc odrębny „świat kwantowy” jako hipostaza nie istnieje.

na przykład uzyskany wynik pomiaru s^\pm i przypisany układowi aktualny stan kwantowy ψ automatycznie traktowane są ontycznie jako klasyczne (obiektywne) fakty fizyczne, co zresztą natychmiast prowadzi do sprzeczności z STW i generuje całe rozumowanie EPR jako *de facto* uzasadnione¹⁴. Jeśli jednak interpretacja QM ma mieć jakikolwiek sens wolny od podobnych paradoksów, wówczas s^\pm oraz stan ψ układu *nie są* klasycznymi faktami fizycznymi, lecz raczej *faktami/zdarzeniami kwantowymi* i należy bardzo starannie (w duchu Bohra) przestrzegać rygoru ich orzekania, analogicznie do specyfikacji układu odniesienia w STW i OTW¹⁵. W podejściu relacyjnym rozumienie tego, czym jest „fakt kwantowy”, radykalnie odbiega od rozumienia klasycznego, ponieważ QM traktowana jest jako teoria relacji i interakcji między układami, a nie ich monadycznych stanów:

Teoria ta powinna być rozumiana jako ujęcie sposobu, w jaki różne fizyczne układy wpływają na siebie, gdy wchodzą w interakcje – a nie tego, jakie ‘są’ te układy. To ujęcie wyczerpuje wszystko, co może być powiedziane o świecie fizycznym. Świat fizyczny musi być opisywany jako sieć oddziałujących komponentów, w której nie ma sensu mówienie o ‘stanie izolowanego układu’. Stan fizycznego układu jest siecią relacji, jakie tworzy on z otaczającymi układami. Fizyczna struktura świata utożsamiona jest z siecią tych powiązań. [Rovelli, 2005b, s. 115]

Aby prawidłowo zinterpretować sieć relacji informacyjnych pomiędzy układami kwantowymi, należy zastosować odpowiednią notację, wyrażającą kontekstualny charakter każdej informacji, która jest lokalnie aktualizowana w seriach interakcji fizycznych. Notacja ta *explicite* wyraża każdy stan kwantowy jako relacyjny (:symetryczną, *fizyczną relację* między wyróżnionymi układami), co w praktyce oznacza, iż jego aktualność jest zawsze względna, zrelatywizowana do układu pobierającego informację, czyli *egzoukładu*. A zatem, w przypadku splątanej pary $\alpha + \beta$ nie wystarczy zapisać: $\psi_{\alpha\beta\text{EPR}}$, gdyż poprawne ujęcie wymaga zaznaczenia, iż jest to

¹⁴ Zob. zwł. Peres, Terno, 2002. Peres i Terno słusznie zauważają, że wyobrażenie „kolapsu funkcji falowej” jako „rozprzestrzeniającego się” w czasoprzestrzeni od początku było błędne i utrzymywało pozorny „paradoks EPR”.

¹⁵ Por. Rovelli, 2005a, s. 219 i nast.; Brown, 2009, s. 693.

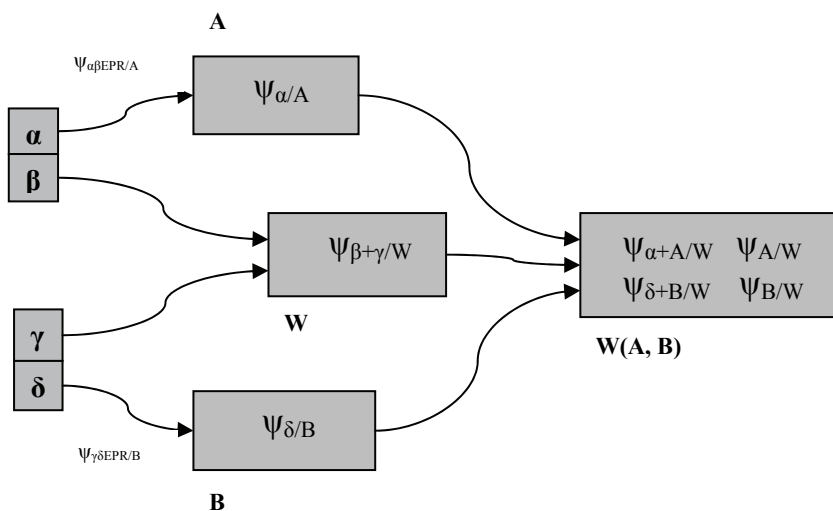
informacja o splątaniu, jakie uzyskał przez odpowiedni pomiar, np. układ A (Alicja), a więc: $\psi_{\alpha\beta\text{EPR}/A} - A$ może ją wykorzystać do dalszych przewidywań w swoim kwantowym układzie odniesienia. Informacja o polaryzacji, jaką B (Bogdan) uzyskał, dokonując indywidualnego pomiaru na fotonie δ , zaś Alicja na fotonie α , to nie fakty fizyczne wyrażające wewnętrzne (monadyczne) własności tych fotonów, ale nieredukowalne relacje informacyjne odnoszące się do kwantowego skorelowania stopni swobody dowolnie wyodrębnionych układów, zatem ich stany musimy zapisać relacyjnie: $\psi_{\alpha/A}$, oraz $\psi_{\delta/B}$. Jest niesłychanie istotne, by pamiętać, iż również W (Wiktor) nie ma żadnego klasycznego dostępu do wewnętrznych właściwości fotonów ani wewnętrznych właściwości układów A i B (np. ich klasycznej pamięci) – musi wejść z nimi w interakcję kwantową, która również aktualizuje pewien konkretny stan relacyjny, np. $\psi_{\alpha+A/W}$ czy $\psi_{B/W}$. Kluczową konsekwencją tego spostrzeżenia jest prosta teza:

Nie można bezpośrednio porównywać (zestawiać) informacji o stanie kwantowym pewnego układu fizycznego, np. α , ponieważ samo mówienie o takim stanie, ψ_{α} , nie ma sensu fizycznego (operacyjnego) – taki sens posiada jedynie relacyjna specyfikacja stanu względem innego układu, np. $\psi_{\alpha/A}$ czy $\psi_{\alpha/W}$, przy czym są to *dwa różne stany relacyjne*. Można to wyrazić inaczej mówiąc, iż nie istnieją żadne obiektywne stany opisujące *wewnętrzne własności* układów: żądanie, by obserwatorzy opisywali „ten sam” fakt kwantowy, np. ψ_{α} , jest pozbawione sensu, gdyż nie istnieje klasyczny sektor uzgadniania obiektywnych stanów rzeczy.

QM to teoria zawierająca jedynie reguły spójności opisów dawanych przez różnych względnych obserwatorów kwantowych (różne egzoukłady), a nie teoria wewnętrznych własności jakichkolwiek układów.

Nieuwzględnienie fizycznej względności stanów kwantowych powoduje, iż cała historia eksperymentu relacjonowana jest z perspektywy absolutnego obserwatora jako „widok znikąd” – widok ten jest jednak niefizyczną fikcją i nie ma możliwości, by w świecie kwantowym taką informacją dysponować, o czym mówią (R1) i (R2). Nie dotyczy to, jak od razu widać, samych jedynie stanów pojedynczych fotonów – relacyjna specyfika QM powoduje, iż teoria przewiduje, zgodnie z uzyskanymi wynikami, iż *względny jest nie tylko stopień splątania układów, ale nawet samo jego istnienie* (różni obserwatorzy kwantowi, np. A i W , mogą się tu

radykalnie różnić w opisie sytuacji fizycznej, a więc jakie układy są splątane i jaka superpozycja funkcji je opisuje). Oznacza to, że fizyczna zasada względności sięga o wiele głębiej niż jej rola w STW i OTW – sam Bohr zdawał się już podążać w tym kierunku, wbrew Einsteinowi i jego realistycznej intuicji. Przyjęcie (R1) i (R2) powoduje, iż paradoks EPR (nielokalność vs. niezupełność QM) czy paradoks wymiany splątania z opóźnionym wyborem (wsteczne „wymazywanie/kreowanie informacji”) nie tylko nie są żadnymi paradoksami, ale nawet już w punkcie wyjścia nie mogą być w ogóle poprawnie sformułowane na gruncie QM. Cały eksperyment można zatem przedstawić jako sieć interakcji-korelacji związanych z różnymi ścieżkami transferu informacji, na przykład w odniesieniu do układu W , który na końcu pobiera lokalnie i kwantowo jako egzoukład informację z układów A i B (kwantowo koreluje z nimi swoje własne stany):



Reguły spójności opisów, jakie zawiera formalizm QM, gwarantują na przykład, iż w przypadku antysymetrycznych stanów polaryzacyjnych zawsze zachodzi relacyjna zależność (w uproszczonym zapisie s^\pm): $s(\psi_{\alpha/W}) = s(\psi_{\alpha+A/W})$ oraz $s(\psi_{\delta/W}) = s(\psi_{\delta+B/W})$, a także – gdy W zrzu-

tował stany $\beta + \gamma$ na stan Bella $\psi_{\beta\gamma\text{Bell}/W}$ – zależności: $s(\psi_{\alpha/W}) = -s(\psi_{\delta/W})$ oraz $s(\psi_{\alpha+A/W}) = -s(\psi_{\delta+B/W})$. Są to jednak stany relacyjne określone przez historię kwantową interakcji układu W i dla W , a nie: $s(\psi_{\alpha})$, $s(\psi_{\delta})$, $s(\psi_A)$, $s(\psi_B)$, dlatego też na przykład zapisy: $s(\psi_{\alpha}) = -s(\psi_{\delta})$ albo $s(\psi_{\beta}) = -s(\psi_{\gamma})$ dla $\psi_{\beta\gamma\text{Bell}}$ nie mają żadnego fizycznego sensu i nie da się sformułować już w punkcie wyjścia żadnego paradoksu przyczynowego ani argumentu na rzecz konieczności przestrzennopodobnej nielokalności jako oddziaływania na odległość¹⁶: w tym sensie również mówienie na przykład o „wstecznym wymazywaniu” stanów jest niepoprawne i wynika z pomieszania kategorii klasycznych (niekontekstualnych) i kwantowych. Powyższe reguły spójności opisów kwantowych, którymi dysponują rozmaici obserwatorzy w uniwersum kwantowym, wynikają z całkowicie liniowej struktury QM, którą w pełni zidentyfikował John von Neumann w swej fundamentalnej pracy *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (1932), dlatego za Rovellim możemy je ogólnie nazwać *warunkami spójności von Neumanna*, mającymi zastosowanie niezależnie od wybranego cięcia między układami, a więc rozróżnienia na egzoukład i endoukład [von Neumann, 1932, s. 222–237; Rovelli, 2005a, s. 216 i nast.]. Warunki te są o tyle zdumiewające i nieklasyczne, że nie wymagają *de facto* żadnej fizycznej nielokalności (i nic o niej nie mówią), ale wymagają uznania zupełnie nowej własności fizycznej, *globalnej nieseparowalności stanów*, która jest prostą konsekwencją matematycznej definicji iloczynu tensorowego na kwantowej przestrzeni stanów [Woszczeck, 2015, s. 140 i nast.] i jednocześnie sprawia, że dla każdego układu kwantowego przetwarzającego informację zagwarantowana jest pełna spójność całej jego historii kwantowej. A zatem, dla układu W , zależności: $s(\psi_{\alpha/W}) = s(\psi_{\alpha+A/W})$ oraz $s(\psi_{\alpha/W}) = -s(\psi_{\delta/W})$, wraz

¹⁶ Podobna analiza w odniesieniu do prostszego eksperymentu EPR: Smerlak, Rovelli, 2007. Zastosowanie tej kwantowej zasady względności połączone z eliminacją wewnętrznych własności układów (czyli odrzucenie klasycznego realizmu metafizycznego z „elementami rzeczywistości”) sprawiłoby oczywiście, że Einstein, Podolsky i Rosen nie mogliby napisać swego słynnego artykułu z 1935 r., jak słusznie zauważył z perspektywy operacjonistycznej Marek Żukowski: Żukowski, 2009, s. 38. Więcej w: Woszczeck, 2010, s. 231 i nast.; Woszczeck, 2015, s. 232 i nast.

ze stanem informacyjnym $\psi_{\beta\gamma\text{Bell}/W}$, są w pełni zgodne z całą przeszłością i przyszłością tego układu w jego własnym kwantowym układzie odniesienia i ta kontekstualna, lokalna zgodność kodowana jest w strukturze QM jako pewnym metajęzyku: pozwala określać i przewidywać zestawy korelacji w każdym lokalnym układzie odniesienia wchodzącym w interakcje z innymi układami. W QM układy odniesienia, wprowadzone przez (R2), nie są matematycznymi fikcjami, lecz wyznaczają realne (ontyczne), fizyczne konteksty interakcji, zaś przejście od jednego układu do drugiego jest również fizycznym działaniem kwantowym (z fizycznymi efektami), co ma głęboki związek z zasadą nieoznaczoności Heisenberga i czysto relacyjną naturą wszystkich wielkości zależnych od stanu ψ ¹⁷. Te ontyczne konteksty interakcji kwantowych możemy nazywać *kontekstami Bohra* (mimo że Bohr analizował je w ramach fizycznej epistemologii, unikając ontologii): są one, zgodnie z opinią Bohra¹⁸, najbardziej elementarnym przejawem nieseparowalności i nowym fundamentalnym pojęciem fizyki, który nie ma żadnego klasycznego odpowiednika.

Relacyjna topologia kwantowa i strukturalizm w fizyce fundamentalnej

Relacyjny charakter wszystkich stanów kwantowych jest ściśle związany z geometrią kwantową, której specyfika odpowiada za szereg trudności związanych z próbami jej zsynchronizowania z geometrią OTW, pomimo, że ta ostatnia jest relacyjną teorią czasoprzestrzeni¹⁹. Oznacza to, że

¹⁷ Zob. np. Dickson, 2004. Argumentacja Dicksona, podobna do Bohrowskiej i oparta na kinematycznych układach odniesienia, jest bardzo instruktywna, ale zbyt zawężająca, ponieważ może utrudniać zrozumienie sytuacji fizycznej w przypadku innych, mniej intuicyjnych par obserwabli kanonicznie sprzężonych. Należałoby ją rozwinąć w kierunku uogólnionych „ram kwantowych” Finkelsteina (zob. Finkelstein, 1997; Woszczek, 2015, s. 83 i nast.; Brown, 2014).

¹⁸ Bohr, jak i m.in. Pauli, konsekwentnie używał określenia „(niepodzielny) fenomen kwantowy”, który jednak ze względu na stałą Plancka wyznaczającą kwant działania ma sens ściśle fizyczny, a nie tylko metodologiczny czy epistemologiczny.

¹⁹ Zob. zvl. Rovelli, 2005a, s. 48–75.

jestemy zmuszeni o wiele głębiej przemyśleć sens procedury relatywizacji w fizyce teoretycznej, a więc założenia (I), szczególnie (I.1), w zakresie różnicy, jaka zachodzi między QM i w pełni klasyczną teorią względności²⁰. OTW dynamizuje geometrię (relacje geometryczne stają się zmiennymi teorii) przez ściśle powiązanie tensora metrycznego pseudoriemannowskiej 4-rozmaitości różniczkowej $(M, \mathbf{g}_{ab}) := \mathbf{M}$ modelującej czasoprzestrzeń (metryka \mathbf{g} jako kowariantne pole 2-tensorowe determinuje przesunięcia równoległe w M) oraz odpowiedniej koneksji afinicznej modelującej pole grawitacyjne w taki szczególny sposób, że właściwie przestaje mieć sens mówienie o autonomicznej czasoprzestrzeni (w sensie fizycznym znika ona jako artefakt operacji cechowania). W tym znaczeniu można argumentować, iż sama OTW sugeruje redukcję rozmaitości M jako sztywnego tła dla fizyki fundamentalnej, w szczególności domniemanego tła kwantowych transferów informacji, takich jak te z powyższego eksperymentu. Jednak OTW, jak każda teoria klasyczna, oparta jest na stosunkowo sztywnej strukturze algebraicznej: jej ogólnie kowariantna algebra obserwabli $C^\infty(M)$, algebra (z jednością) funkcji gładkich na rzeczywistej M , z których rozmaitość ta może być w pełni odtworzona, jest przemienne, zaś zbiór jej maksymalnych ideałów jest izomorficzny z jej rzeczywistym widmem $Sp(C^\infty) \subset \mathbb{R}$, a zatem, mimo iż żadne punkty czasoprzestrzeni nie są dynamicznie identyfikowalne, to jednak globalne wartościowania algebry $C^\infty(M)$ zafiksowują \mathbb{R} -widmo i właściwą dla mechaniki klasycznej boolowską strukturę obserwabli (funkcji gładkich na M) jako scenę całej kinematyki. Struktura ta i zarazem logika klasycznych zdarzeń (c -zdarzeń) w OTW jest „płaska”, co ma precyzyjny topologiczny sens odpowiadający intuicji, iż fizyka klasycznej grawitacji respektuje założenia (I) i (II). Jeśli fizyczne stany układu klasycznego, na przykład grawitacyjne, są elementami przestrzeni Stone’a $\mathcal{S}(\mathbf{B}) \equiv CO(Ult)(\mathbf{B})$ (tzn. kraty otwarto-domkniętych podzbiorów przestrzeni ultrafiltrów) boolowskiej algebry \mathbf{B} zdań na temat tego układu [WoszczeK, 2014, s. 125 i nast.], wówczas au-

²⁰ OTW jest klasyczna dokładnie w tym sensie, że można ją w całości sformułować za pomocą formalizmu Hamiltona-Jacobiego (oparta jest na klasycznej teorii informacji, tzn. geometria/logika czasoprzestrzennych relacji między zdarzeniami zbudowana jest na strukturze boolowskiej).

tomatycznie \mathbf{B} jest też izomorficzna z kratą ciągłych globalnych cięć stałego snopa Φ nad przestrzenią $\mathcal{S}(\mathbf{B})$, którego żdźbłem jest algebra Boole'a $\mathbf{Z}_2 \equiv \{0, 1\}$: mając dany stały snop Φ i znając pełną kratę ciągłych cięć nad $\mathcal{S}(\mathbf{B})$ możemy odkodować fizykę klasycznych stanów grawitacyjnych (i zarazem logikę klasycznych „światów możliwych”). Można powiedzieć, że jest to substrat-tło albo „kościelce” teorii, realizujące klasyczną antyrelacyjną czy, w każdym razie, nierelacyjną „zasadę absolutnej reprezentowalności” (Mallios-Zafiris) za pomocą algebry rzeczywistych, globalnych wartościowań funkcji obserwabli (łącznej algebry \mathbb{R} z dzieleniem) [Zafiris, Mallios, 2007]. Każda klasyczna ontologia mechaniki i czasoprzestrzeni musi ten nierelacyjny kościelce zaakceptować: „płaska” logika stanów eliminuje z fizyki konteksty, które występują tu jedynie wirtualnie jako bierne układy odniesienia.

QM wprowadza zaś o tyle nowy typ geometrii stanu, że struktura obserwabli jest nieboolowska i nie istnieją takie globalne, niezmiennicze wartościowania [Woszczek, 2014, s. 127–143]²¹, co wywołuje znaczące komplikacje przy próbach kwantyzacji grawitacji. Konkretny typ operacji, taki jak na przykład lokalna ekstrakcja informacji dotyczącej liniowej polaryzacji układu α lub δ , wyznacza, jak widzieliśmy, dla pobierającego układu lokalny, relacyjny *kontekst Bohra* \mathfrak{B} działania kwantowego, dany odpowiednią abelową algebrą $\mathcal{A}_{\mathfrak{B}}$ zdarzeń kwantowych (operatorów rzutowych \mathcal{P} w zespolonej, separowalnej przestrzeni Hilberta \mathcal{H}), która jest po prostu przemienną W^* -algebrą, podalgebrą pełnej algebry \mathcal{A} kwantowych obserwabli, która zawiera się w algebrze $\mathcal{L}(\mathcal{H})$ wszystkich ograniczonych operatorów liniowych na \mathcal{H} ²². Jest tak, ponieważ pojedynczy samosprężony operator, reprezentujący transfer kwantowej informacji, generuje zawsze abelową algebrę von Neumanna na \mathcal{H} , ale zdarzenia kwantowe, q -zdarzenia, *nie są* zdarzeniami klasycznymi, c -zdarzeniami,

²¹ Tak jak w OTW przestaje być adekwatne, ściśle rzecz biorąc, mówienie o układach inercjalnych, tak w QM, ze względu na brak tych globalnych wartościowań, traci sens mówienie o nierelacyjnych, separowalnych stanach układów, albo – używając języka Einsteina – „elementach rzeczywistości”.

²² Pojęcie *kontekstu* \mathfrak{B} można zdefiniować ogólniej za pomocą przemiennych \mathbb{R} -algebr będących podalgebrami globalnie nieprzemiennej algebry kwantowych obserwabli, reprezentowanych hipermaksymalnymi operatorami hermitowskimi na \mathcal{H} .

które stanowią bazę mechaniki klasycznej i konstrukcji (M, \mathbf{g}) . Te pierwsze modelowane są za pomocą domkniętych, uporządkowanych relacją inkluzji liniowych podprzestrzeni (:projektorów \mathcal{P}) zespolonej przestrzeni \mathcal{H} , a zatem tworzą one kraty ortomodularne $\mathbb{L}(\mathcal{H})$, tj. *kraty kwantowe*, których nie można zanurzyć w zupełnych kratach boolowskich i *nie* nadają się ani na dobry odpowiednik kraty podprzestrzeni klasycznej przestrzeni fazowej, ani na dobrą fizyczną logikę z implikacją materialną [Varadarajan, 2007, s. 18–147]²³. Konteksty Bohra \mathfrak{B} można zdefiniować jako maksymalne dystrybutywne podkraty w $\mathbb{L}(\mathcal{H})$, które wzajemnie jednoznacznie odpowiadają podalgebrom $\mathcal{A}_{\mathfrak{B}}$, ponieważ przemienność rzutowań pociąga za sobą dystrybutywność elementów w $\mathbb{L}(\mathcal{H})$.

Nawet w świecie kwantowym fizyczne stany/transfery informacji, na przykład pola grawitacyjnego lub elektromagnetycznego, „wyglądają” zgodnie z postulatem Bohra lokalnie, w odpowiednim przybliżeniu, odpowiednio klasycznie, tzn. ich logika zbliża się do płaskiej: jeśli \mathbb{L} jest dystrybutywna, wtedy jest izomorficzna z kratą globalnych cięć stałego snopa Φ o łożysku \mathbf{Z}_2 nad przestrzenią Stone’a $\mathcal{S}(\mathbb{L})$. Jednak już dla pełnej kraty kwantowej $\mathbb{L}(\mathcal{H})$ należy zdefiniować przestrzeń Stone’a $\mathcal{S}(\mathbb{L}(\mathcal{H}))$, która nie jest lokalnie zwarta, a snop Φ nad nią *nie jest stały* i logika q -zdarzeń jest „zakrzywiona”, co powoduje zablokowanie jakiegokolwiek możliwości skonstruowania ontologii świata kwantowego w oparciu o nierelacyjny „kościół” fizyki klasycznej, (I) i (II): płaska logika mechaniki z wirtualnymi układami odniesienia jest tylko bardzo szczególnym przypadkiem; w ogólniejszej sytuacji konteksty pobierania informacji są fizycznie realne, a wszystkie stany nieredukowalnie relacyjne. Fundamentalne dla QM ogólne twierdzenie Bella-Kochena-Speckera²⁴ w sformułowaniu dla W^* -algebr (niezależnie od reprezentacji w \mathcal{H}) można więc rozumieć jako ściśle matematyczne wyrażenie epistemologicznej zasady Bohra, iż nie istnieje

²³ Odróżnianie c -zdarzeń i q -zdarzeń (w nawiązaniu do c -liczb i q -liczb Diraca) pomaga uniknąć w punkcie wyjścia ekwiwokacji, która jest permanentnym problemem przy konstruowaniu kwantowych teorii grawitacji (analogicznie do mieszania pojęć przedrelatywistycznych i relatywistycznych). Tak pierwsze, jak i drugie rozumiemy wyłącznie *via* struktury algebraiczne (ujmowane kategorijsko), które je definiują.

²⁴ Zob. Bell, 1966; Kochen, Specker, 1967; Varadarajan, 2007, s. 126 i n.; Woszczeck, 2014, s. 125 i nast.

możliwość rekonstrukcji kwantowej rzeczywistości (algebry/statystyki q -zdarzeń lub, równoważnie, kwantowej historii układu) za pomocą *jakiegokolwiek pojedynczego zestawu boolowskich układów pomiarowych/sond czasoprzestrzennych*²⁵, co definitywnie przekreśla możliwość użycia algebry $C^\infty(M)$ c -zdarzeń i wiarygodność postulatu (I). \mathbf{M} nie nadaje się więc na mikrotło transferów informacji, a procedurę relatywizacji – czego wymaga sama QM – należy zastosować na jeszcze głębszym poziomie w odniesieniu do samych lokalizacji albo rzutowań w \mathcal{A} , czyli q -zdarzeń. Jak to związęle ujął David Finkelstein: „Teoria kwantowa jest przede wszystkim rozszerzonym typem teorii względności. Kwantujemy przez relatywizację” [Finkelstein, 1997, s. IX].

Uwzględnienie kontekstów Bohra \mathfrak{B} , tak, by kwantowa geometria informacji realizowała uogólnioną zasadę względności i umożliwiała wtórną rekonstrukcję geometrii \mathbf{M} jako efektywne przybliżenie, wymaga zupełnie nowego podejścia matematycznego, opartego na relatywizacji samych lokalnych wartościowań obserwabli (operacji lokalizacji w \mathcal{A}) i \mathbb{R} -widma. Innymi słowy, należy pozbyć się sztywnego tła fizyki informacji, które w OTW jest konceptualną pochodną zafiksowania \mathbb{R} -widma: chcemy konsekwentnie wyeliminować czasoprzestrzeń i gładkie różniczkowalności jako domniemaną pierwotną arenę dynamiki [Zafiris, Mallios, 2007; Mallios, 2008; Mallios, Zafiris, 2011]. Nie jest przesądzone, jak powinna wyglądać taka kwantowo-relacyjna topologia, ale, jak się zdaje, naturalną strategią jest wyekstrahowanie najogólniejszych geometrycznych własności kwantowych przestrzeni stanu (W^* -algebr \mathcal{A} dowolnego typu) w ramach podejść kategoryjnych i następnie konstruowanie czysto relacyjnej fizyki bez metod klasycznej geometrii różniczkowej (różniczkowalnych wiązek włóknistych i koneksji w tych wiązkach, jako uogólnienia przeniesienia równoległego wektorów) [Raptis, 2006] i bez angażowania pojęcia „pomiaru” z NRQM dla 3+1-czasoprzestrzeni, które zakłada nieadekwatną, prezentystyczną metafizykę. Prezentyzm narusza zasadę względności

²⁵ Bohr, 1949, s. 210 (tłum. pol. w: Bohr, 1963, s. 64): „...Evidence obtained under different experimental conditions cannot be comprehended within a single picture, but must be regarded as *complementary* in the sense that only the totality of the phenomena exhausts the possible information about the objects”.

w OTW, a kwantowy prezentyzm ją rujnuje, choć w samej QM nie ma niczego, co miałyby to sugerować.

Aby nie wprowadzać do podstaw fizyki dualizmu q -zdarzeń i c -zdarzeń²⁶, choćby instrumentalistycznego (co przypisywano Bohrowi i innym), zakładamy za Bohrem, że czysto kwantowa struktura relacyjna przejawia się nie tyle w pojedynczych elementarnych zdarzeniach/transferach informacji (:pojedynczych rzutowaniach ρ), co ich globalnym porządku, tzn. ich sekwencjach i statystykach, próbkowanych przez całe lokalne, reprezentowane za pomocą $\mathcal{A}_{\mathfrak{M}}$ relacyjne układy boolowskie, czyli całe rodziny rzutowań $\{\rho_{\mathfrak{M}}\}_{\mathfrak{M} \in \mathfrak{M}(\mathcal{A})}$. Problemem matematycznym jest zatem nietrywialne sklepanie lokalnych algebr $\mathcal{A}_{\mathfrak{M}}$, kontekstów Bohra, które w pełni podlegają zarazem relatywizacji (żaden układ boolowski ani stan kwantowy nie jest wyróżniony) oraz komplementarności – można je traktować jako niedające się zredukować *kwantowo-dynamiczne układy odniesienia*²⁷. Ze względu na fakt, iż interesuje nas konstruktywne sklepanie całych rodzin rzutowań i ich zanurzeń w nieprzemiennej \mathcal{A} (tzn. boolowskich nakryć kwantowych przestrzeni obserwabli), a zatem szczególne funktory między kategoriami algebr boolowskich oraz algebr von Neumanna (lub, jeszcze ogólniej, C^* -algebr Rickarta, których rzutowania tworzą jeszcze kraty, podczas gdy spektralne C^* -algebry już nie zawsze), konieczna staje się rezygnacja ze standardowej geometrii wiązek włóknistych z OTW oraz projektowanie konstrukcji opartych na presnopach²⁸ i wykorzystywaniu

²⁶ W istocie jedynym sensownym założeniem dla fizyki fundamentalnej jest odrzucenie tez (I) i (II), tzn. przyjęcie, że wszystkie zdarzenia fizyczne są q -zdarzeniami. Jego odrzucenie w praktyce uniemożliwia spójną kosmologię kwantową.

²⁷ Strategię tę klarownie przedstawił na przykład Elias Zafiris: Zafiris, 2000; Zafiris, 2006. Odpowiada to pierwotnej intuicji Bohra: „The dependence on the reference system, in relativity theory, of all readings of scales and clocks may even be compared with the essentially uncontrollable exchange of momentum or energy between the objects of measurements and all instruments defining the space-time system of reference, which in quantum theory confronts us with the situation characterized by the notion of complementarity. In fact this new feature of natural philosophy means a radical revision of our attitude as regards physical reality, which may be paralleled with the fundamental modification of all ideas regarding the absolute character of physical phenomena, brought about by the general theory of relativity” [Bohr, 1935, s. 702].

²⁸ Presnop jest kontrawariantnym funktorem na kategorii otwartych zbiorów abstrakcyjnej przestrzeni topologicznej.

uogólnionej procedury usnopienia presnopów. Tak jak eliminacja relatywistycznych „paradoksów” dla lokalnych obserwatorów wymaga przejścia od grupy Galileusza przez grupę Poincarégo do pełnej grupy dyfeomorfizmów $Diff(\mathbf{M})$, tak eliminacja „paradoksów” kwantowych jest możliwa przez przejście od regularnej do nietrywialnej, globalnie skręconej topologii (bez globalnych cięć) presnopów na kategorii lokalnych algebr elementarnych zdarzeń (boolowskich układów). Istnieje od lat 90. kilka różnych strategii konstruowania takich uogólnionych kategorijsno-powowych teorii i zarazem geometrycznych logik kwantowych z wbudowaną kontekstualnością, tj. relatywizacją $\mathcal{P}(\mathcal{A})$, które nie wymagają dla fizyki żadnej bazowej gładkiej rozmaitości jak \mathbf{M} ani klasycznych, niekontekstualnych prawdopodobieństw. Po pionierskiej pracy Adelmmana i Corbetta [Adelman, Corbett, 1995], pojawiły się podejścia Ishama-Butterfielda-Hamiltona-Döringa (początkowo w kontekście interpretacji spójnych historii kwantowych), Malliosa-Zafirisa-Raptisa (w ramach abstrakcyjnej geometrii różniczkowej), szkoły z Nijmegen (N.P. Landsman, B. Spitters, C. Heunen) oraz Hansa F. de Groote. Matematycznie różnią się od siebie, zwłaszcza w zakresie używanych kategorii i typu funktorów, ale można je rozumieć jako radykalne uogólnienia relacyjnego podejścia do QM (zob. np. Zafiris, 2000, s. 2769), odrzucające zasadę absolutnej reprezentowalności i opartą na niej logikę. Ważną ich zaletą jest możliwość eliminacji kwantowej nielokalności („działania na odległość” łamiącego lokalną przyczynowość OTW) jako pozornej z perspektywy lokalnych układów odniesienia $\mathcal{A}_{\mathfrak{B}}$: nielocalne korelacje stanów układów bezpośrednio wynikają z kohomologicznych ograniczeń nałożonych na presnopu na kategorii boolowskich kontekstów \mathfrak{B} lub zdarzeń, a więc są ściśle związane z ich globalną topologią (zob. np. Abramsky, Brandenburger, 2011; Abramsky, Mansfield, Barbosa, 2012, także Mallios, Zafiris, 2011, s. 11 i nast.). Dobrze współgra to z czysto fizyczną intuicją, iż w kwantowym wszechświecie blokowym (bez upływu czasu i z czysto relacyjnymi stanami informacyjnymi) korelacje te są wynikiem globalnych więzów nałożonych na lokalną kwantową dynamikę i są przejawem tej samej głębokiej własności QM co kontekstualność stanów, a nie niekontrolowalnej nadświatłowej sygnalizacji. W kon-

tekście kwantowej teorii informacji można tę własność określić, dla odróżnienia od „nielokalności”, jako globalną nieseparowalność stanów.

W istocie, jak podkreślał Bohr od lat 30., kwantowa relatywizacja wyklucza podstawowe intuicje klasycznej mechaniki i jej roboczą metafizykę obiektów. Niechęć, jaką może budzić konsekwentnie relacyjne podejście w fizyce fundamentalnej, najczęściej wiąże się więc z trzema zastrzeżeniami. Mają one charakter metafizycznych uprzedzeń, a dwa pierwsze związane są z pewnymi „idolami” w fizyce [Finkelstein, 1997, s. 36 i nast., 153–184; Finkelstein, 1999], analogicznymi do Baconowskich.

Pierwsze związane jest z poważnym oporem wobec porzucania idei klasycznej niekontekstualności (I), czyli oparte jest na głęboko zakorzenionym imperatywie zachowania postulatu Świata Klasycznego (albo, równoważnie, Absolutnego Obserwatora). Imperatyw ten nie ma jednak w sobie nic naturalnego czy apriorycznego, poza bardzo długą historią zachodniej metafizyki, która ukształtowała fizyczne obrazy świata: jest to wspólny dla zachodniej metafizyki i epistemologii „ideał transcendencji” jako uprzywilejowanej perspektywy poznania, umożliwiającej określanie struktury kategorialnej bytu i natury substancji niezależnie od partykularnego, kontekstualnego i materialnego działania w obrębie świata fizycznego. W fizyce nowożytnej przybrał on matematyczną, przejrzystą postać mechaniki hamiltonowskiej z przestrzenią fazową jako rozmaitością symplektyczną i grupą dyfeomorfizmów symplektycznych wraz z kanonicznym formalizmem Hamiltona-Jacobiego. Umożliwia on opis stanu i dynamiki układów fizycznych niezależnie od przekształceń kanonicznych (równania Hamiltona zachowują swoją postać) i zgodnie z zasadą najmniejszego działania Eulera-Lagrange’a-Jacobiego (ruch po trajektoriach będących geodetykami metryki Riemanna w przestrzeni konfiguracyjnej układu). W takiej mechanice stan może być określony jednoznacznie i niekontekstualnie, niezależnie od fizycznego kontekstu procesu pobierania informacji o nim [Woszczeck, 2014, s. 120–127], co między innymi oznacza tyle, że raz pobrana z układu informacja nie musi być aktualizowana, preselekcja stanów fizycznych wystarcza: postselekcja stanu jest zbyteczna, nie dostarcza nowych informacji. Precyzyjne określenie warunków brzegowych (stanu początkowego) oraz dynamiki układu wyczerpuje

wiedzę o nim i w tym sensie dodatkowe pomiary stanu końcowego, w przypadku idealnym, nic nie wnoszą. QM jest teorią całkowicie nieklasyczną, ponieważ nie jest możliwe skonstruowanie takiej przestrzeni konfiguracyjnej układu kwantowego, dla którego postselekcja stanów byłaby zbyteczna: *de facto* fundamentalną zasadą QM jest właśnie twierdzenie, iż zawsze możliwe jest uzyskanie nowej informacji o układzie, mimo iż w pełni znany jest jego stan kwantowy ψ . Całkowite *novum* tej sytuacji polega na tym, iż pobieranie informacji o układzie wyznacza zarazem zupełnie nowy kontekst fizyczny (nie: epistemiczny, w słabym sensie): aktualizacja informacji jest zarazem nowym fizycznym stanem kontekstualnym (relacyjnym) i to przejście od jednego układu odniesienia do drugiego powiązane jest ze stochastycznymi aspektami całego lokalnego opisu. Głęboka kontekstualność QM z pewnością nie wyklucza metafizycznego realizmu jako takiego, ale blokuje realizm klasycznej metafizyki i jakąkolwiek wersję niekontekstualnych „elementów rzeczywistości” (świat Absolutnego Obserwatora jako idol mechaniki). Pojęcia „stanu”, „faktu/stanu rzeczy” czy „aktualności” są w kwantowym świecie *fizycznie względne* [Woszczyk, 2014, s. 143–150].

Drugie zastrzeżenie, ściśle powiązane z pierwszym, wynika z głębokiej niechęci do rezygnacji zarówno z wewnętrznych własności, jak i nieredukowalnie jednostkowej „natury” obiektów jako idoli metafizyki mechaniki. Twierdzenie jednak, iż obiekty fizyczne muszą jako stabilne byty posiadać jakieś (choćby minimalnie określone) własności wewnętrzne, również nie ma w sobie nic apriorycznego i podtrzymywane jest raczej wskutek przywiązania do długiej tradycji zachodniej metafizyki – ujęcia wykluczające pierwotne, bazowe indywidua i jakiegokolwiek ich wewnętrzne własności są bardzo rzadkie i zdominowane przez tradycję (post)arystotelesowską lub atomistyczną. Nawet ontologie zbudowane na znacząco rozszerzonym katalogu relacyjnych własności zewnętrznych wprowadzają elementarne własności indywiduacyjne, przypominające pod względem metafizycznej funkcji *prima materia* Arystotelesa albo średniowieczną *haecceitas* dla empirycznych indywiduów. Paradygmat relacyjny jest ukierunkowany eliminatywistycznie, gdyż od początku demontuje ontologie wymagające takich pierwotnych, nieredukowalnych własności indywiduacyjnych, co

w przypadku QM już w punkcie wyjścia uniemożliwia wprowadzanie „elementów rzeczywistości” jako pewnych jednostkowych bazowych obiektów fizycznych lub przypisanych im indywidualnych stanów. Lokalne działania kwantowe również są kontekstualno-relacyjne – jak widzieliśmy, nawet pomiar Bella i rzutowanie na stan splątany jest zrelatywizowany do kwantowego układu odniesienia, a dodatkowo stopień splątania jest zależny od stanu ruchu obserwatora w czasoprzestrzeni, co sprawia, że myślenie o samym splątaniu jako wewnętrznej (immanentnej) własności pewnego złożonego, splątanego układu, przedstawianego jako generyczne „kwantowe indywidualum” nowego typu, jest nie do utrzymania. Oznacza to, że w kwantowej czasoprzestrzeni różni kwantowi obserwatorzy (podukłady Wszechświata) mogą odmiennie opisywać nawet elementarne relacje między zdarzeniami, czyli *de facto*, patrząc na to z klasycznej perspektywy, opisują odmiennie kwantowe zdarzenia – jest to radykalizacja sposobu, w jaki działa już relatywistyczna zasada względności dla trójwymiarowych obiektów z czasoprzestrzeni newtonowskiej.

Trzecie zastrzeżenie wiąże się z reguły z niechęcią do ontologicznego strukturalizmu, który kojarzony jest głównie z jego dawnymi lingwistycznymi, antropologicznymi i socjologicznymi wersjami, o wiele zaś słabiej z matematycznymi, fizycznymi i metafizycznymi. Co do tych ostatnich, istnieje w XX wieku lekceważona tradycja strukturalistyczna, zwłaszcza w odniesieniu do filozofii fizyki, poczynszy na tak różnych postaciach jak H. Poincaré, H. Weyl, A. Eddington czy E. Cassirer, która zyskała na znaczeniu wraz z dalszym rozwojem teorii grup i teorii cechowania w fizyce, a ostatnio podejść kategoryjnych w fizyce fundamentalnej, które są niejako „naturalnie” strukturalistyczne²⁹. Struktura kwantowa, o którą chodzi w ontologii relacyjnej QM, nie jest pewną wybraną, abstrakcyjną strukturą matematyczną, lecz fizyczną strukturą działań/ścieżek transferu informacji i do jej zdefiniowania nie potrzeba *a priori* ani tła czasoprzestrzennego (:bazowej gładkiej struktury różnaitości riemannowskiej z metryką), ani

²⁹ Ostatnio szeroką filozoficzną obronę ontologicznego strukturalizmu przedstawili James Ladyman i Don Ross: Ladyman, Ross, 2009. Zob. także: Ladyman, 2002; French, Ladyman, 2003; Lam, Esfeld, 2012. W języku polskim stanowiska strukturalistyczno-holistycznego bronił Michał Tempczyk: Tempczyk, 1981.

jednostkowych obiektów, indywiduów, jako bazy superwencji dla relacji informacyjnych. Ma to kluczowe znaczenie w fizyce fundamentalnej, kiedy szukamy finitystycznych procedur pełnej kwantyzacji czasoprzestrzeni nie tylko bez polegania na strukturze riemannowskiej, ale nawet bez fiksowania klasycznej topologii czasoprzestrzeni einsteinowskiej jako postulowanej bazy dla teorii w pełni kwantowej. Ontologia w pełni strukturalistyczna ze strukturami pierwotnie globalnymi wymaga znaczącego przemodelowania wyobraźni fizycznej, która historycznie ukształtowana jest przez metafizyczne intuicje bazowych indywiduów (bytów atomowych) o niekontekstualnych stanach i własnościach wewnętrznych w lokalnym otoczeniu i w strumieniu „czasu tła”. Intuicje te, podobnie jak intuicje fizyki przedrelatywistycznej, jeśli nie są korygowane lub odrzucone, prowadzą do permanentnych paradoksów oraz wrażenia, że QM jest niepojętą i nie jest możliwe jej zrozumienie. Sytuacja ta bardzo utrudnia postęp w fizyce fundamentalnej, ponieważ hamuje próby klarownego formułowania zasad fizycznych, które mogłyby ułatwić dalsze prace teoretyczne.

Można sformułować propedeutycznie kilka podstawowych wytycznych dla całego programu relacyjnego w fizyce fundamentalnej, którego podstawowym komponentem jest relacyjna QM.

DEWIZA 1: RELACYJNOŚĆ STANU / KONTEKSTUALNOŚĆ

Zapomnij o absolutnej rzeczywistości (aktualności) stanu. Każdy fizyczny stan układu jest definiowalny wyłącznie w lokalnym kontekście działania (nie istnieje fizyczny superobserwator) i nie ma sensu mówienie o nim niezależnie od innego układu kwantowego (egzoukładu), względem którego jest określany.

DEWIZA 2: ONTOLOGIA OPERACYJNO-INFORMACYJNA

Myśl działaniami (strzałkami) i ich złożeniami. Każde zdarzenie kwantowe (q -zdarzenie) jest fizycznym działaniem/interakcją, a każde fizyczne działanie jest zawsze relatywistycznie lokalną, kwantową wy-

mianą informacji, tzn. dynamicznym skorelowaniem stopni swobody podukładów Wszechświata.

DEWIZA 3: GLOBALNA NIESEPAROWALNOŚĆ

Pamiętaj, że fundamentalną, całkowicie nieklasyczną własnością QM jest globalna, formalna nieseparowalność stanu/działania i to ona zapewnia spójność całej teorii, zakodowaną w jej strukturze liniowo-tensorowej, niezależnie od wybranego cięcia między układami kwantowymi (zasada spójności von Neumanna).

DEWIZA 4: KWANTOWA SYMETRIA CZASU

Zapomnij o upływie czasu jako tle działań i klasycznych, absolutnych (niekontekstualnych) prawdopodobieństwach. Relacje informacyjne w zamkniętym Wszechświecie są pierwotne, aczasowe i nie potrzebują a priori klasycznych prawdopodobieństw, asymetrii czasu ani jego globalnego „upływu”: mechanika kwantowa jest w pełni czasowo-symetryczna.

Ostatnia dewiza, dla wielu filozofów przyrody zwykle najtrudniejsza do zaakceptowania, jest być może, obok pierwszej, kluczowa dla zrozumienia unikalności QM w kontraście do klasycznej mechaniki lagranżowsko-hamiltonowskiej, która również nie wprowadza żadnej asymetrii czasu, ale charakteryzuje się „płaską” logiką przestrzeni stanu i nie wymaga predykcyjnej postselekcji stanu (jest w tym sensie *klasycznie* deterministyczna). Oddzielny problem czasu (który standardowo nie jest kwantową obserwabłą) oraz prawdopodobieństw (uznawanych często w kontekście QM zarówno za niekontekstualne, jak i ontyczne) dotyczy nie tylko samej QM, ale już zagadnienia kwantowej struktury Wszechświata, dlatego odgrywa centralną rolę w próbach konstruowania każdej ogólnie kowariantnej kosmologii relacyjnej. Kwantowa teoria miary jako fundament uogólnionej, kwantowej teorii prawdopodobieństwa jest z perspektywy metafizycznej niezwykle interesująca, gdyż wyklucza na przykład częstościową interpretację prawdopodobieństw i zdaje się demontować podstawy tradycyjnych

sformułowań indeterminizmu, ale jej możliwe konsekwencje w odniesieniu do ontologii czasu są nadal słabo zbadane. Dodatkowo w przypadku korelacji kwantowych, takich jak te ujawniające się w eksperymentach z wymianą splątania, kolejność czasowa pomiarów nie ma żadnego znaczenia. Zarówno przyjęcie pełnej symetrii czasu, jak i czasowosymetryczne ujęcie QM, są w kontekście fundamentalnej ontologii relacyjnej całkowicie naturalne jako konsekwencja fizycznej, kwantowo-termodynamicznej relatywizacji zarówno entropii jak i nieodwracalności ewolucji układów (zob. np. Connes, Rovelli, 1994; Montesinos, Rovelli, 2001; Rovelli, 2005a, s. 140–144). W tym sensie przemyślane strategie konstruktywistyczne w metafizyce, budujące na potrzeby fizyki odpowiednie ontologie aczasowe, bez nakładania na kwantową teorię prawdopodobieństwa klasycznych czy potocznych intuicji „stawania się” i „upływu czasu”, są z pewnością optymalne.

Bibliografia

- Abramsky S., Brandenburger A., (2011), „The sheaf-theoretic structure of non-locality and contextuality”, *New Journal of Physics*, 13, 113036.
- Abramsky S., Mansfield S., Barbosa R.S., (2012), „The cohomology of non-locality and contextuality”, *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science*, 95, s. 1–14.
- Adelman M., Corbett J.V., (1995), „A sheaf model for intuitionistic quantum mechanics”, *Applied Categorical Structures*, 3, s. 79–104.
- Ali A.F., Das S., Vagenas E.C., (2011), „A proposal for testing quantum gravity in the lab”, *Physical Review D*, 84, 044013.
- Alsing P.M., Fuentes-Schuller I., Mann R.B., Tessier T.E., (2006), „Entanglement of Dirac fields in noninertial frames”, *Physical Review A*, 74, 032326.
- Alsing P.M., McMahon D., Milburn G.J., (2004), „Teleportation in non-inertial frame”, *Journal of Optics B*, 6, S834.
- Alsing P.M., Milburn G.J., (2003), „Teleportation with a uniformly accelerated partner”, *Physical Review Letters*, 91, 180404.
- Aubin D., (1997), „The withering immortality of Nicolas Bourbaki: a cultural connector at the confluence of mathematics, structuralism, and the Oulipo in France”, *Science in Context*, 10, s. 297–342.
- Awodey S., (1996), „Structure in mathematics and logic: a categorical perspective”, *Philosophia Mathematica*, 4, s. 209–237.

- Bekenstein J.D., (2012), „Is a tabletop search for Planck scale signals feasible?”, *Physical Review D*, 86, 124040.
- Bell J.S., (1966), „On the problem of the hidden variables in quantum mechanics”, *Reviews of Modern Physics*, 38, s. 447–452.
- Berchera I.R., Degiovanni I.P., Olivares S., Genovese M., (2013), „Quantum light in coupled interferometers for quantum gravity tests”, *Physical Review Letters*, 110, 213601.
- Bohr N., (1935), „Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?”, *Physical Review*, 48, s. 696–702.
- Bohr N., (1949), „Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics”, [w:] *Albert Einstein: Philosopher – Scientist*, [ed.] P.A. Schilpp, Evanston/III., Open Court, s. 201–241.
- Bohr N., (1963), *Fizyka atomowa a wiedza ludzka*, przeł. W. Staszewski, S. Szpikowski, A. Teske, Warszawa, PWN.
- Bondecka-Krzykowska I., (2007), *Matematyka w ujęciu strukturalnym*, Poznań, Wydawnictwo Naukowe UAM.
- Brown M.J., (2009), „Relational quantum mechanics and the determinacy problem”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 60, s. 679–695.
- Brown M.J., (2014), „Quantum frames”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2014, 45, s. 1–10.
- Brukner Č., Aspelmeyer M., Zeilinger A., (2005), „Complementarity and information in «delayed choice for entanglement swapping»”, *Foundations of Physics*, 35, s. 1909–1919.
- Callender C., (2008), „Finding «real» time in quantum mechanics”, [w:] *Einstein, Relativity and Absolute Simultaneity*, [eds.] W.L. Craig, Q. Smith, London – New York, Routledge, s. 50–72.
- Cohen O., (1999), „Counterfactual entanglement and nonlocal correlations in separable states”, *Physical Review A*, 60, s. 80–84.
- Connes A., Rovelli C., (1994), „Von Neumann algebra automorphisms and thermodynamics relation in generally covariant quantum theories”, *Classical and Quantum Gravity*, 11, s. 2899–2917.
- Dickson M., (2004), „A view from nowhere: quantum reference frames and uncertainty”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2004, 35, s. 195–220.
- Finkelstein D.R., (1997), *Quantum Relativity: A Synthesis of the Ideas of Einstein and Heisenberg*, Berlin – Heidelberg – New York, Springer.
- Finkelstein D.R., (1999), „Third relativity”, *International Journal of Theoretical Physics*, 38, s. 2937–2940.
- French S., Ladyman J., (2003), „Remodelling structural realism: quantum physics and the metaphysics of structure”, *Synthese*, 136, s. 31–56.
- Halder M., Beveratos A., Gisin N., Scarani V., Simon C., Zbinden H., (2007), „Entangling independent photons by time measurement”, *Nature Physics*, 3, s. 692–695.

- Hartle J.B., (1995), „Spacetime quantum mechanics and the quantum mechanics of spacetime”, [w:] *Gravitation and Quantizations: Proceedings of the 1992 Les Houches Summer School* (vol. LVII), [eds.] B. Julia, J. Zinn-Justin, Amsterdam, Elsevier, s. 285–480.
- Hartle J.B., (2006), „Generalizing quantum mechanics for quantum gravity”, *International Journal of Theoretical Physics*, 45, s. 1391–1397.
- Kochen S., Specker E.P., (1967), „The problem of hidden variables in quantum mechanics”, *Journal of Mathematics and Mechanics*, 17, s. 59–87.
- Ladyman J., (2002), „Science, metaphysics and structural realism”, *Philosophica*, 67, s. 57–76.
- Ladyman J., Ross D., (2009), *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*, Oxford – New York, Oxford University Press.
- Lam V., Esfeld M., (2012), „The structural metaphysics of quantum theory and general relativity”, *Journal for General Philosophy of Science*, 43, s. 243–258.
- Ma X., Zotter S., Kofler J., Ursin R., Jennewein T., Brukner Č., Zeilinger A., (2012), „Experimental delayed-choice entanglement swapping”, *Nature Physics*, 8, s. 478–484.
- Mallios A., (2008), „ \mathcal{A} -Invariance: an axiomatic approach to quantum relativity”, *International Journal of Theoretical Physics*, 47, s. 1929–1948.
- Mallios A., Zafiris E., (2011), „The homological Kähler–de Rham differential mechanism. II: Sheaf-theoretic localization of quantum dynamics”, *Advances in Mathematical Physics*, 2011, 189801.
- McLarty C., (2004). „Exploring categorical structuralism”, *Philosophia Mathematica*, 12, s. 37–53.
- Minkowski H., (1909), *Raum und Zeit. Vortrag gehalten auf der 80. Naturforscherversammlung zu Köln am 21 September 1908*, Leipzig – Berlin, B.G. Teubner.
- Montesinos M., Rovelli C., (2001), „Statistical mechanics of generally covariant quantum theories: a Boltzmann-like approach”, *Classical and Quantum Gravity*, 18, s. 555–569.
- Peres A., (2000), „Delayed choice for entanglement swapping”, *Journal of Modern Optics*, 47, s. 139–143.
- Peres A., Terno D.R., (2002), „Lorentz transformations of open systems”, *Journal of Modern Optics*, 49, s. 1255–1261.
- Petersen A., (1963), „The philosophy of Niels Bohr”, *Bulletin of the Atomic Scientists*, 19 (7), s. 8–14.
- Petkov V., (2009), *Relativity and the Nature of Spacetime*, 2. ed., Berlin – Heidelberg – New York, Springer.
- Pikovski I., Vanner M.R., Aspelmeyer M., Kim M.S., Brukner Č., (2012), „Probing Planck-scale physics with quantum optics”, *Nature Physics*, 8, s. 393–397.
- Raptis I., (2006), „Categorical quantum gravity”, *International Journal of Theoretical Physics*, 45, s. 1495–1523.

- Reck E., Price M., (2000), „Structures and structuralism in contemporary philosophy of mathematics”, *Synthese*, 125, s. 341–387.
- Resnik M., (1997), *Mathematics as a Science of Patterns*, Oxford, Oxford University Press.
- Rovelli C., (1996), „Relational quantum mechanics”, *International Journal of Theoretical Physics*, 35, s. 1637–1678.
- Rovelli C., (2005a), *Quantum Gravity*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Rovelli C. (2005b), „Relational quantum mechanics”, [w:] *Quo Vadis Quantum Mechanics?*, [eds.] A. Elitzur, S. Dolev, N. Kolenda, Berlin – Heidelberg – New York, Springer, s. 113–120.
- Smerlak M., Rovelli C., (2007), „Relational EPR”, *Foundations of Physics*, 37, s. 427–445.
- Tempczyk M., (1981), *Strukturalna jedność świata*, Warszawa, PWN.
- Van Fraassen B.C., (2010), „Rovelli’s world”, *Foundations of Physics*, 40, s. 390–417.
- Varadarajan V.S., (2007), *Geometry of Quantum Theory*, 2nd ed., New York, Springer.
- Woszczeck M., (2010), *Ukryta całość przyrody a mikrofizyka*, Poznań, Wydawnictwo Naukowe IF UAM.
- Woszczeck M., (2014), „Ontologia realizmu kontekstualnego w teorii kwantowej”, *Lectiones & Acroases Philosophicae*, 2014, VII/1 (*Spory o realizm*), s. 113–151.
- Woszczeck M., (2015), *Platonic Wholes and Quantum Ontology*, Frankfurt am Main – Berlin – Bern – Bruxelles – New York – Oxford – Wien, Peter Lang.
- Zafiris E., (2000), „Probing quantum structure with Boolean localization systems”, *International Journal of Theoretical Physics*, 39, s. 2761–2778.
- Zafiris E., (2006), „Category-theoretic analysis of the notion of complementarity for quantum systems”, *International Journal of General Systems*, 35, s. 69–89.
- Zafiris E., Mallios A., (2007), „Topos-theoretic relativization of physical representability and quantum gravity”, arXiv:gr-qc/0610113v2.
- Zych M., Costa F., Pikovski I., Brukner Č., (2011), „Quantum interferometric visibility as a witness of general relativistic proper time”, *Nature Communications*, 2, 505.
- Zych M., Costa F., Pikovski I., Ralph T.C., Brukner Č., (2012), „General relativistic effects in quantum interference of photons”, *Classical and Quantum Gravity*, 29, 224010.
- Żukowski M., (2007), „«It ain’t necessarily so»: paradoksy interpretacji paradoksu Einsteina”, *Świat Nauki*, 4, s. 36–39.

Relational quantum mechanics, the universal principle of relativity and the foundations of physics

ABSTRACT. The principal issues concerning the foundations of physics are how to solve the puzzle of the apparent discrepancy between the theoretical frameworks of classical space-time physics and quantum microphysics as well as, in particular, how to clarify

the meaning of the notion of a ‘mechanical state’. I argue that the element that constantly produces the so-called quantum paradoxes is a straightforward, classical, i.e. non-relational and noncontextual, interpretation of a quantum state, which at a single point makes almost all quantum effects, such as the delayed-choice entanglement swapping, classically deviant or obscure. Quantum theory, above all, demands a radical generalization of the principle of relativity, and the relational quantum events, q-events, are extremely different from the classical non-relational (space-time) c-events. However, this theoretical shift is hard to implement without significant remodeling of the ontological convictions concerning the preferred interpretation of mechanics itself, which is commonly founded on the invariant ‘elements of reality’ (evolving-in-time atomic states of affairs) scheme and substantialist imagery. This is a strong argument in favor of structural approaches in fundamental physics and a purely time-symmetric formulation of quantum mechanics.

KEY WORDS: relational quantum mechanics, principle of relativity, contextual realism, Carlo Rovelli, structuralism, quantum relational topology, q-events

Marek Woszczek, Instytut Filozofii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, ul. Szamarzewskiego 89C, 60-568 Poznań

