Ocena osiągnięcia naukowego pt. "Kwantyzacja i deformacje powierzchni Riemanna w kwantowych teoriach pola i teorii strun" dr Piotra Sułkowskiego, stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego, oraz dorobku naukowego, organizacyjnego i dydaktycznego habilitanta

Przygotowanie niniejszej recenzji przewodu habilitacyjnego dr Piotra Sułkowskiego sprawiło mi wielką przyjemność z dwóch powodów. Pierwszy powód jest taki, że moim zdaniem niektóre wyniki osiągnięte przez dr Piotra Sułkowskiego odzwierciedlają ducha najlepszej fizyki teoretycznej i matematycznej. Artykuły dr Sułkowskiego należą bowiem do kategorii przełomowych prac naukowych i, jestem o tym przekonany, przecierają drogę do dalszych nowatorskich odkryć w fizyce teoretycznej. Po drugie, w zasadzie nie jest łatwo ocenić osiągnięcia naukowe, które obejmują zaawansowane aspekty dziedzin tak bardzo różnych od siebie, jak te przedstawione tutaj, a mianowicie teorię krzywych algebraicznych, teorie strun, teorię węzłów, modele całkowalne i fizykę biopolimerów. Jednakże w tym szczególnym przypadku mam osobistą przyjemność, ponieważ okazuje się, że w dużej mierze, moje zainteresowania naukowe pokrywają się z tymi właśnie dziedzinami.

Ocena cyklu publikacji przedstawionych jako osiągnięcie naukowe

Aby umieścić wyniki dr Piotra Sułkowskiego we właściwym kontekście, pozwolę sobie na krótką dygresję w przeszłość. Około dwudziestu lat temu, pojawiła się praca A. Schwarz, Mod.Phys.Lett. A6 (1991) 2713, w której Albert Schwarz rozwiązał zagadnienie klasyfikacji par quasi-komutujących operatorów różniczkowych P oraz Q. Są to operatory, których komutator spełnia równanie $[P, Q] = 1$. Motywacje do podjęcia takiego zadania pochodziły z badań na temat dwuwymiarowej grawitacji kwantowej oraz modeli macierzowych, co stanowiło jeden z wiodących tematów badań w teorii strun tamtejszych czasów. Już wcześniej wiedziano, iż pary komutujących operatorów P, Q związane są z afinicznymi krzywymi algebraicznymi określonym wzorem $A(P, Q) = 0$, gdzie A jest wielomianem dwóch zmiennych. Natomiast Gregory Moore podsunął w 1990 r. pomysł, że pary P, Q quasi-komutujących operatorów mogą być utożsamione z kwantowymi analogami krzywych algebraicznych. W takiej interpretacji, zbiór wszystkich par P, Q odegrał rolę przestrzeni modułów kwantowej krzywej algebraicznej. W pracy Schwarza zostało przedyskutowane także rozszerzenie do przypadku quasi-komutujących supersymetrycznych operatorów P, Q. W kolejnych latach liczba modeli, których amplitudy albo funkcja partycji została wyprowadzona w sposób ścisły, wzrastała dramatycznie. To wszystko było możliwe dzięki rozwinięciu nowatorskich technik, takich jak metoda lokalizacji i teoria Seiberga-Wittena. Dodatkowe modele zostały rozwiązane za pomocą korespondencji odkrytych niedawno, jedną z nich jest tak zwana korespondencja AGT, które łączą ze sobą teorie zupełnie różne od siebie. Na przykład, okazuje się, że supersymetryczne teorie pola Nekrasova-Shatashviliego są powiązane z kwantową teorią Liouvilla, zespołami β (β ensembles) oraz niektórymi modelami całkowalnymi. W rezultacie intensywnych prac wielu naukowców, powstał cały szereg modeli, dla których funkcja partycji Z może być wyznaczona w sposób ścisły w różnych reżimach. Takie funkcje partycji są zazwyczaj rozgałęzionymi funkcjami dwóch parametrów x i y. Znaczenie parametrów x i y zmienia się w zależności od rozpatrywanego modelu. W teoriach Cherna-Simonsa są one wartościami własnymi tzw. holonomii płaskich koneksji, podczas gdy w teoriach Seiberga-Wittena są raczej związane z polem elektrycznym Higgsa i jego polem dualnym. Różne gałęzie funkcji partycji Z odpowiadają różnym reżimom i są określone przez rozwiązania algebraicznych równań typu $A(x, y) = 0$. Kwantyzacja takich krzywych $A(x, y) \longrightarrow \hat{A}(\hat{x}, \hat{y})$ została zaproponowana już przez kilku autorów. W dużym przybliżeniu, kwantyzacja taka polega na zastąpieniu komutatywnych zmiennych x i y operatorami $\hat{x}, \hat{y}$. $\hat{x}$ i $\hat{y}$ tworzą quasi-komutatywne pary, co oznacza, że $[\hat{x}, \hat{y}] = \hbar$. Parametr $\hbar$ odgrywa tutaj rolę stałej Plancka. Najważniejszą cechą operatora $\hat{A}(\hat{x}, \hat{y})$ jest to, że "zeruje" on funkcję partycji Z, w takim sensie, że spełnione jest równanie $\hat{A}(\hat{x}, \hat{y})Z = 0$. To równanie może być rozpatrywane jako analog równania Schrödingera dla "funkcji falowej" Z. Program kwantyzacji krzywych algebraicznych napotkał na ogromne trudności, w szczególności związane z wyborem sposobu uporządkowania kolejności operatorów $\hat{x}, \hat{y}$ w definicji operatora $\hat{A}(\hat{x}, \hat{y})$.

Naszkicowany powyżej obraz badań nad kilkoma formalnymi aspektami teorii strun i fizyki wysokich energii określa sumarycznie w dużym skrócie scenerię, w której pojawiły się osiągnięcia naukowe przedstawione przez dr Sułkowskiego w autoreferacie. Należy podkreślić od samego początku, że są to wyniki o wyjątkowym znaczeniu zarówno w fizyce jak i w matematyce. Jeden z tych wyników jest przedyskutowany w sposób szczegółowy w pracy [H4], gdzie został rozwiązany problem znalezienia kwantowej krzywej algebraicznej $\hat{A}(\hat{x}, \hat{y})$ spełniającej równanie typu Schrödingera $\hat{A}Z = 0$. Poprzez odpowiedni proces kwantyzacji $x, y \leftrightarrow \hat{x}, \hat{y}$, w [H4] została opracowana metoda, dzięki której można zbudować operator różniczkowy $\hat{A}(\hat{x}, \hat{y})$. W tym celu wprowadzono nowatorską hierarchię równań, która, jeżeli rozwinięcie funkcji partycji względem "stałej Plancka" $\hbar$ jest znane, umożliwia wyznaczenie współczynników dowolnego rzędu występujących w analogicznym rozwinięciu operatora $\hat{A}(\hat{x}, \hat{y})$. Odwrotnie, jeżeli znane jest a priori rozwinięcie operatora $\hat{A}(\hat{x}, \hat{y})$ w szereg potęgowy względem $\hbar$, wtedy można korzystać z powyżej wymienionej hierarchii równań, aby wyznaczyć rekursywne rozwinięcie Z. W ten sposób można zdefiniować funkcje partycji zupełnie nowych teorii. Procedura konstrukcji kwantowych krzywych algebraicznych $\hat{A}(\hat{x}, \hat{y})Z$ zaproponowana przez dr Sułkowskiego we współpracy z Sergeiem Gukovem jest zaskakująco prosta. Została ona sprawdzona i potwierdzona w [H4], na podstawie licznych przykładów. Bardzo intrygujące i nietrywialne jest to że, dla dużej klasy modeli, skończone rozwinięcie funkcji partycji jest wystarczające do ścisłego wyznaczenia operatora $\hat{A}$. Warunki, przy których krzywa algebraiczna $A(x, y) = 0$ jest "kwantowalna" stanowią szereg reguł kwantyzacji przedyskutowanych w pracy [H4] i tam uzasadnionych matematycznie za pomocą argumentów z K-teorii. Byłoby interesujące sprawdzić, czy hierarchia przedstawiona w [H4] wiąże się z hierarchiami Manin-Radul, Mulase-Rabin and Kac-van de Leur wykorzystanymi w wyżej wymienionej pracy Schwarza.

Kwantyzacja krzywych algebraicznych występujących w modelach całkowalnych, teoriach strun i pola pozwoli na daleko idące zastosowania. Najlepszym przykładem tego jest odkrycie superwielomianów A, które są głównym tematem prac [H1,H2,H3]. Wyprowadzenie takich superwielomianów jest według mnie wyjątkowo nietrywialnym osiągnięciem. W celu uzyskania takiego resultatu trzeba bowiem użyć faktu, że teorie Cherna-Simonsa, których funkcje partycji zawierają niezmienniki węzłów w postaci wielomianów, mogą być zanużone w teorie strun. Po takim zanużeniu, wykorzystując wysoko nietrywialne dualności, niezmienniki węzłów ulegają procesowi "kategoryzacji" i zostają wyrażone jako funkcje liczb charakteryzujących widmo tzw. stanów BPS w teorii strun. Superwielomiany A zostały uzyskane rozpatrując dwuparametrowe deformacje powierzchni Riemanna (pojęcie powierzchni Riemanna i krzywych algebraicznych jest tutaj stosowane zamiennie zgodnie z założeniami w autoreferacie) związane z obecnością, obok zmiennych x, y, dodatkowych parametrów w funkcjach partycji teorii fizycznych. W szczególności, w pracy [H3] tzw. kolorowe niezmienniki Jonesa zostały uogólnione za pomocą deformacji typu t, gdzie t jest związany ze spinem stanów BPS. Natomiast w [H2] deformacja typu t została połączona z deformacją typu Q (parametry Q określają przestrzeń modułów rozmaitości charakteryzującej rozpatrywaną teorię). Powstały w ten sposób superwielomiany A, które ujednolicają wcześniej znane niezmienniki wielomianowe i homologiczne. W przypadku niektórych węzłów, zostały one obliczone w [H1]. Uważam, iż superwielomiany A mają ogromny potencjał w zastosowaniach w teorii węzłów i w teorii strun.

Prace [H13,H14], w których została znaleziona nowa interpretacja krzywych Seiberga-Wittena oraz krzywych lustrzanych związana z układami przecinających się D4-bran i D6-bran uważam za bardzo interesujące. Artykuły [H13,H14] pokazują, iż niektóre czterowymiarowe teorie supersymetryczne są związane ze swobodnymi teoriami fermionów w dwóch wymiarach. Swobodne teorie fermionów pojawiają się rownież w innych modelach topologicznych i macierzowych badanych przez dr Sułkowskiego w pracach [H1-H14]. Takie powszechne występowanie fermionów w teoriach, których funkcje partycji da się wyrazić wykorzystując równanie typu Schrödingera $\hat{A}(\hat{x},\hat{y})Z = 0$, wskazuje na to, że Grassmanniany mogą być fundamentalnym składnikiem w lepszym zrozumieniu własności przestrzeni modułów kwantowych krzywych algebraicznych. Należy bowiem pamiętać, że w powyżej wymienionym artykule A. Schwarza właśnie Grasmanniany odegrały ważną rolę w klasyfikacji par quasi-komutujących operatorów. Zresztą, powiązania pomiędzy Grassmannianami i krzywami algebraicznymi są już znane i zostały wyczerpująco przedyskutowane przez G. Segala oraz G. Wilsona i później przez E. Wittena. Z jednej strony, przestrzenie modułów powierzchni Riemanna są zawarte w uniwersalnym Grassmannianie Sato. Z drugi zaś strony wiemy, że Grassmanniany łączą się z teoriami swobodnych fermionów zdefiniowanymi na powierzchniach Riemanna.

Istotna część przedstawionych prac, np. [H5,H6,H8,H9,H11,H12], skupia się na modelach macierzowych i zespołach β. Również w tym zakresie niektóre wyniki uzyskane przez dr Sułkowskiego mogą być określone jako nowatorskie, ponieważ udało się znaleźć reprezentacje kilku funkcji partycji Nekrasova dotyczących supersymetrycznych teorii z różnymi grupami cechowania i w różnych wymiarach w postaci modeli macierzowych albo zespołów β. Rozumiem, że takie reprezentacje odpowiadają wyłącznie sektorowi instantonowemu, a nie całej funkcji partycji Nekrasova.

Ocena pozostałych publikacji

Bardzo wysoko oceniam prace dr Sułkowskiego w zakresie biofizyki, szczególnie zaś jego artykuły na temat węzłów w białkach. Pomimo tego, że na razie węzły obserwuje się w białkach stosunkowo rzadko (są one obecne tylko w kilkuset białkach), liczba nowych białek zawierających węzły ciągle rośnie. Odkrycie skokowego przebiegu procesu rozciągania "zawęźlonych" białek na pewno jest ważnym wynikiem, o czym świadczy liczba cytowań prac habilitanta w tej dziedzinie. Należy również pamiętać, że za pomocą techniki AFM (mikroskopia sił atomowych - Atomic Force Microscopy) można sprawdzić własności mechaniczne białek w sposób doświadczalny, ale potrzeba jeszcze dużo czasu zanim wszystkie znane struktury białek zostaną zbadane. Akurat z tego powodu, wyrafinowane metody numeryczne, tak jak te stosowane przez dr Sułkowskiego i wspołpracowników, są bardzo istotne dla lepszego zrozumienia właściwości białek.

Ocena dorobku naukowego, organizacyjnego i dydaktycznego dr Piotra Sułkowskiego

Dorobek naukowy dr Piotra Sułkowskiego jest imponujący. Przedstawił on 28 publikacji z listy filadelfijskiej, znacząca większość z nich w czasopismach o wysokim współczynniku oddziaływania (IF-impact factor). Co prawda, artykuł z Vincentem Bourchardem został opublikowany w czasopiśmie Advances in Theoretical and Mathematical Physics, którego IF wynosi zaledwie 0,855. W tym szczególnym przypadku, jednak, pozory są mylące. W rzeczywistości, czasopismo to zachowuje bardzo wysokie standardy. Habilitant wygłosił wykłady na zaproszenie i inne wykłady na wielu ważnych konferencjach zarówno w Polsce jak i za granicą. Imponująca jest również lista kierowanych przez niego projektów badawczych. Projekty naukowe dr Sułkowskiego zostały sfinansowane w ramach prestiżowych grantów polskich i zagraniczych tak jak na przykład ERC Starting Grant, Grant Homing-Plus, Marie-Curie Research Grant (International Outgoing Fellowship) i Humboldt Research Fellowship. Uważam liczbę cytowań habilitanta (według bazy Web of Science (WoS)) jako bardzo dobrą jak na młodego naukowca pracującego w dziedzienie fizyki teoretycznej i matematycznej. Natomiast zgadzam się z tym, że baza ta nie zawiera wszystkich cytowań. Według bazy INSPIRE-HEP dr Sułkowski ma 477 cytowań oraz index Hirscha 14. Na pewno w uzyskaniu tak wielu i w dodatku wyjątkowo dobrych wyników, niektórych z nich o charakterze wysoko nowatorskim, dr Sułkowskiemu dopomogły pobyty w renomowanych placówkach naukowych i współpraca z wybitnymi naukowcami. Niemniej jednak, deklaracje współpracowników pozwalają określić bardzo dobrze jaki był wkład habilitanta w poszczególne publikacje. Wkład ten w prawie wszystkich artykułach jest znaczący i, szczególnie w pracach [H1-H14], dominujący. Należy także podkreślić, że dr Sułkowski jest jedynym autorem w przybliżeniu jednej trzeciej przedstawionych publikacji, co świadczy o jego samodzielności naukowej. W jego artykułach znajdują się główne wątki rozumowania, które da się łatwo wyodrębnić i pojawiają się niezależnie od tego, czy artykuły były napisane tylko przez niego czy razem ze współautorami.

Dr Sułkowski pełnił obowiązki członka komitetu organizacyjnego kilku konferencji, dwóch w Polsce i jednej w Kanadzie. O jego wysokich umiejętnościach organizacyjnych świadczy również kierownictwo licznych grantów, które zostały już wymienione wcześniej. Ponadto, jest redaktorem czasopisma Journal of Discrete Mathematics i był redaktorem czasopisma Philosophic Nature. Dorobek dydaktyczny dr Sułkowskiego oceniam jako dobry. Habilitant przeprowadził już 480 godzin zajęć ze studentami z przedmiotów matematycznych i fizycznych. Natomiast dorobek popularyzatorski wydaje się wyjątkowo dobry szczególnie dlatego, że echa wybitnych osiągnięć dr Sułkowskiego przekroczyły już granicę środowiska naukowego i były tematem różnych artykułów w mediach. Oprócz tego, sam mogłem się przekonać o tym, że habilitant jest utalentowanym prelegentem, słuchając jego wykładu podczas konferencji stringtheory.pl/2013 w Krakowie. Ma on zdolność przedstawiania w sposób prosty tematów, które nie są łatwe nawet dla fizyków.

Wniosek końcowy

Podsumowując, bez wątliwości mogę stwierdzić, że dr Piotr Sułkowski należy do ścisłej czołówki młodych badaczy pracujących w dziedzinie fizyki teoretycznej. W mojej opinii jego osiągnięcia naukowe znacznie przykraczają wymogi ustawowe konieczne do uzyskania stopnia doktora habilitowanego. Wnioskuję więc o nadanie mu takiego stopnia w ramach obowiązującej procedury. Biorąc pod uwagą jego wartościowy dorobek naukowy, wnoszący elementy nowatorskie, równocześnie zgłaszam entuzjastycznie wniosek o o wyróżnienie jego rozprawy habilitacyjnej.

Szczecin, 4 grudnia 2013

Franco Ferrari