

AUTOREFERAT

DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWO-BADAWCZA

Moje zainteresowania naukowe dotyczą wybranych problemów fizyki statystycznej i hydrodynamiki. Są to zarówno aspekty fundamentalne, jak i obliczenia teoretyczne oraz numeryczne prowadzące do wyników bezpośrednio mierzalnych w eksperymentach. Ważnym elementem pracy badawczej są także doświadczenia bezpośrednio związane z własnymi wynikami teoretyczno-numerycznymi.

Obecnie głównym nurtem moich badań jest teoretyczna analiza podstawowych właściwości tzw. miękkiej materii (zwanej także płynami złożonymi), czyli ośrodków płynnych lub półpłynnych o specyficznej złożonej strukturze. Miękka materia to na przykład koloidy, zawiesiny, polimery, ciekłe kryształy, żele, ośrodki sypkie, substancje powierzchniowo czynne czy ośrodki biologiczne. Ich cechą wspólną jest złożona struktura, zmienność i skłonność do samoorganizacji. W ciągu ostatnich dwudziestu lat zainteresowanie wiodących ośrodków naukowych badaniem właściwości miękkiej materii rośnie lawinowo, zarówno ze względu na ogromne zastosowania technologiczne, biologiczne i medyczne, jak i na brak wyjaśnienia teoretycznego obserwowanych procesów. Ich zrozumienie to ciekawe wyzwanie dla teoretyków, zainteresowanych fizyką statystyczną. Analiza właściwości miękkich ośrodków motywowana jest także zastosowaniami przemysłowymi (przede wszystkim w nowoczesnych mikro-fabrykach typu „lab-on-chip”, a także np. w układach filtracyjnych, przemyśle kosmetycznym, spożywczym, farmaceutycznym i chemicznym) oraz rozwojem badań doświadczalnych w kontekście układów biologicznych, takich jak zawiesiny czy kolonie bakterii lub glonów, mikro-włókna, białka i DNA. W centrum moich zainteresowań naukowych znajduje się wyznaczenie oddziaływań hydrodynamicznych w układach wielu mikrocząstek zawieszonych w płynie i ich wpływu na dynamikę ośrodków dyspersyjnych. Droga poszukiwań naukowych, które doprowadziły mnie do preferencji i wyboru takiej właśnie tematyki badawczej, przedstawia się następująco.

Matematyczne podstawy relatywistycznej teorii kinetycznej

Przedmiotem mojej pracy doktorskiej było relatywistyczne równanie Boltzmann'a, a zwłaszcza podstawy matematyczne relatywistycznej teorii kinetycznej i relatywistycznej hydrodynamiki. Bezpośrednią motywacją wyboru tej właśnie tematyki było zainteresowanie zastosowaniami astrofizycznymi, a mianowicie opisem teoretycznym bardzo szybkiego ruchu materii w dyskach akrecyjnych. Wstępem do tego zagadnienia była wykonana w mojej pracy

magisterskiej analiza produkcji entropii w relatywistycznym gazie [1]¹. Później wspólnie z moim promotorem prof. Łukaszem A. Turskim wyprowadziłam równania uogólnionej relatywistycznej hydrodynamiki za pomocą metody operatorów rzutowych. Następnie zainteresowały mnie podstawy matematyczne relatywistycznej teorii kinetycznej. We współpracy z mgr Markiem Dudyńskim zbadalam strukturę zlinearyzowanego relatywistycznego równania Boltzmanna. Podaliśmy dowód istnienia rozwiązania tego równania, jego jednoznaczności i przyczynowości; przeanalizowaliśmy także właściwości operatora zderzeniowego dla szerokiej klasy przekrojów czynnych [2,3]. W 1988 r. za prace na temat relatywistycznej teorii kinetycznej otrzymaliśmy wspólnie z dr Markiem Dudyńskim zespołową nagrodę naukową III Wydziału Polskiej Akademii Nauk.

Tematykę tę kontynuowałam także po doktoracie. Razem z prof. Łukaszem A. Turskim zbadaliśmy matematyczne i fizyczne podstawy relatywistycznej hydrodynamiki, m. in. sens współmienniczości lorentzowskiej przy separacji wolnych i szybkich modów [4]. W 1992 r. dzięki zastosowaniu nowej metody matematycznej wspólnie z dr Markiem Dudyńskim udało się nam sformułować dowód istnienia i przyczynowości rozwiązania nieliniowego relatywistycznego równania Boltzmanna [5]. Ze względu na zainteresowanie środowiska naukowego, piętnaście lat później powróciłam do tej tematyki. W 2007 r. wspólnie z dr Dudyńskim w pracy [23] podaliśmy interpretację fizyczną klas przekrojów czynnych, dla których stosuje się dowód podany wcześniej w [5]. Mimo że praca [23] opublikowana została w mało znanym na świecie polskim piśmie *Journal of Technical Physics*, jest ona znana i cytowana przez światowych ekspertów badających strukturę matematyczną równania Boltzmanna. Ten kierunek badań jest obecnie intensywnie rozwijany na świecie (w dużej mierze ze względu na zainteresowanie podstawami matematycznymi opisu gazów poprzez mody hydrodynamiczne), a prace [2,3] są rokrocznie cytowane w pracach oryginalnych, przeglądowych i monograficznych.

Rozszerzenie tej tematyki stanowiły dalej moje prace poświęcone modulowanym falom elektromagnetycznym w relatywistycznej plazmie, zapoczątkowane podczas rocznego (1989/90) pobytu w Lawrence Berkeley Laboratory Uniwersytetu Kalifornijskiego w Berkeley w USA jako stypendysta Fulbrighta. We współpracy z prof. Torem Flå i prof. Allanem Kaufmanem dokonaliśmy separacji wolnych i szybkich modów w takim układzie. Skonstruowaliśmy zasadę działania Hamiltona i zastosowaliśmy ją aby otrzymać układ sprzężonych równań pola i równań kinetycznych [6].

Oddziaływania hydrodynamiczne i współczynniki transportu ośrodków dyspersyjnych

Po powrocie do Polski zajęłam się także fizyką statystyczną ośrodków dyspersyjnych i teorią oddziaływań hydrodynamicznych. Rozpoczęłam pracę w nowo utworzonej przez prof. Bogdana Cichockiego w IPPT PAN grupie fizyków skoncentrowanych na tej tematyce (dr E. Wajnryb i dr J. Bławdziewicz). Dziedzina ta zainteresowała mnie ze względu na istniejące wyzwania teoretyczne, ich ścisły związek z wynikami eksperymentów, a także szerokie zastosowania w nowoczesnych technologiach, biologii, medycynie i chemii.

Najpierw we współpracy z dr Jerzym Bławdziewiczem obliczyliśmy samoruchliwość rozrzedzonej zawiesiny w przepływie ścinającym. Przedmiotem zainteresowania była zależność samoruchliwości od współczynnika ścinania, wyznaczona poprzez rozwinięcie w szereg potęg

¹ Numeracja odnosi się do listy publikacji umieszczonej na końcu autoreferatu.

pierwiastka z liczby Pecleta (proporcjonalnej do współczynnika ścinania) [7].

Następnie zajęłam się analizą wielocząstkowych oddziaływań hydrodynamicznych i ich wpływu na wartość współczynników transportu zawiesin. Badania te stanowiły treść mojej rozprawy habilitacyjnej.

W pracach [8,12,13] razem z prof. B. Cichockim i dr hab. E. Wajnrybem wyznaczyłam efektywne współczynniki transportu rozrzedzonej zawiesiny twardych kul. W tym celu przeprowadziliśmy rozwinięcie wirialne. Obliczyliśmy wkłady pochodzące od oddziaływań trójcząstkowych do współczynników sedymentacji, translacyjnej i rotacyjnej samodyfuzji oraz lepkości efektywnej. Podczas obliczeń okazało się, że dotychczas stosowana poprawka uwzględniająca warstwę smarowania prowadzi do sztucznych rozbieżności. Skonstruowana nowa poprawka jest zbieżna, ponieważ modyfikuje tylko ruchy względne kul.

Ponieważ znacząca część wkładów trójcząstkowych do współczynników transportu pochodzi od konfiguracji, w których co najmniej jedna para kul znajduje się bardzo blisko siebie, zajęłam się także zbadaniem oddziaływania między dwiema bliskimi sferami w przepływie Stokesa. Tematykę tę zapoczątkowałam w 1997/98 r., podczas rocznego pobytu w École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles w Paryżu [9]. Grupa uczonych francuskich z Paryża i Rouen przeprowadzała badania eksperymentalne, dr hab. E. Wajnryb opracował program do obliczeń numerycznych macierzy tarcia hydrodynamicznego. Wspólnie z prof. F. Feuillebois skonstruowaliśmy model oddziaływań hydrodynamicznych przez warstwę smarowania sprzężonych z siłami tarcia mechanicznego powierzchni. Model ten następnie zweryfikowałam poprzez porównanie jego przewidywań z bardzo dokładnymi danymi doświadczalnymi dla względnego ruchu translacyjnego dwu kul przy zadanych siłach zewnętrznych.

Po powrocie do Polski w latach 2000-2002 kontynuowałam tę tematykę. Wspólnie z prof. F. Feuillebois i dr N. Lecoqiem przeanalizowaliśmy wyniki nowych badań eksperymentalnych wykonanych w Rouen, a następnie porównałam je z moimi przewidywaniami teoretycznymi (ruch obrotowy pary cząstek sferycznych) [10]. Pokazałam, że alternatywny model oddziaływań jedynie poprzez płyn bez kontaktu mechanicznego powierzchni jest niezgodny z wynikami pomiarów [11].

Najważniejsze wnioski z tych badań są następujące. Po pierwsze, zbliżające się do siebie chropowate cząstki po pewnym czasie stykają się ze sobą wyrzuceniami swoich powierzchni (w przeciwieństwie do idealnie gładkich cząstek, które zgodnie z teorią Stokesa mogą się zetknąć dopiero po nieskończone długim czasie zbliżania się do siebie). Po drugie, oddziaływania hydrodynamiczne cząstek o chropowatej powierzchni można opisać za pomocą idealnie gładkich cząstek efektywnych o nieco większym rozmiarze, przy uwzględnieniu dodatkowych sił tarcia mechanicznego między ich powierzchniami.

Ruchliwość cząstek w pobliżu powierzchni międzyfazowych

Kolejnym moim wynikiem, otrzymanym wspólnie z prof. B. Cichockim, dr hab. E. Wajnrybem i prof. G. Nägele, było znalezienie algorytmu obliczania quasi-dwuwymiarowych oddziaływań hydrodynamicznych między sferami poruszającymi się w cieczy wzdłuż płaskiej powierzchni swobodnej (oddzielającej ciecz od gazu), a w szczególności obliczenie długozasięgowej asymptotyki dla macierzy ruchliwości [14]. Takie quasi-dwuwymiarowe układy są obecnie intensywnie badane eksperymentalnie ze względu na interesujące przejścia fazowe (od

przypadkowych ruchów Browna do heksagonalnego uporządkowania odległych od siebie cząstek paramagnetycznych w polu magnetycznym), natomiast stosowane wcześniej wyrażenia teoretyczne na współczynniki dyfuzji własnej nie były poprawne. W pracy [15] opracowałam model quasi-dwuwymiarowych cząstek punktowych. Używając precyzyjnych wyników [14], w pracy [15] oszacowaliśmy dokładność przybliżenia polegającego na zsumowaniu wkładów punktowych od wszystkich par kul. Natomiast praca [24] (przygotowana już po habilitacji) dotyczy matematycznej analizy właściwości funkcji Greena dla takich quasi-dwuwymiarowych układów, co zaowocowało wyprowadzeniem użytecznych i prostych wzorów, przydatnych w obliczeniach. Specyfika quasi-dwuwymiarowych oddziaływań hydrodynamicznych została szczegółowo zaprezentowana w pracy monograficznej [59].

Wspólnie z prof. Jerzym Bławdziewiczem i dr hab. E. Wajnrybem wyznaczyłam ruchliwość cząstek w pobliżu powierzchni międzyfazowych rozdzielających dwa niemieszające się płyny o różnych lepkościach [37,38]. Obliczone współczynniki dyfuzji cząstek w pobliżu powierzchni pokrytych substancją powierzchniowo czynną pozwoliły na opracowanie metody odróżniania powierzchni zanieczyszczonych od czystych, na podstawie pomiaru dyfuzji własnej cząstek próbnych w pobliżu takich powierzchni międzyfazowych. Wyniki można będzie stosować do dalszego modelowania ruchu w pobliżu błon biologicznych.

Analiza wielocząstkowych oddziaływań hydrodynamicznych w obecności pola grawitacyjnego

Zagadnieniem, które szczególnie mnie interesuje w ciągu ostatnich dziesięciu lat, jest poznanie natury wielocząstkowych oddziaływań hydrodynamicznych w obecności pola grawitacyjnego [16-21,25-28,32-33,47-49,55,62]. Mikrocząstki znajdujące się blisko siebie (ale nie stykające się ze sobą) opadają grawitacyjnie znacznie szybciej niż cząstki samotne. Tworzą grupy, w obrębie których wykonują oscylacyjne ruchy względne, które przez dłuższy czas stabilizują grupę jako całość. Wiele uwagi poświęciłam teoretycznemu określeniu charakterystycznych cech dynamiki grup mikrocząstek opadających grawitacyjnie w lepkim płynie, w oparciu o rozwiązania równań Stokesa (uzyskane numerycznie bardzo dokładną metodą multipolową i kody HYDROMULTIPOLE lub wyznaczone w oparciu o analityczny model punktowy, który dobrze przybliży wiele istotnych cech dynamiki).

W szczególności zainteresowało mnie wyznaczenie nowych stacjonarnych rozwiązań dla dynamiki grup cząstek opadających grawitacyjnie (stanów równowagi dla ruchów względnych), przebadanie ich stabilności, a także wyznaczenie portretów fazowych niestacjonarnych klas rozwiązań oraz przeanalizowanie znaczenia rozwiązań stacjonarnych dla dynamiki o dowolnych warunkach początkowych [20,21,33].

Ważnym wynikiem było opracowanie modelu teoretycznego procesu samoistnego obracania się mikro-cząstek o niesymetrycznych kształtach podczas ich opadania grawitacyjnego w lepkim płynie oraz określenie, w jaki sposób i w jakim tempie cząstki o niesymetrycznym kształcie samorzutnie zmieniają orientację na skutek opadania grawitacyjnego [33]. Proces ten jest istotny dla zrozumienia metod pływania mikroorganizmów, np. glonów i bakterii, które typowo są 10%-30% gęstsze niż środowisko wodne, w którym się poruszają. Ma on także znaczący wpływ na strukturę osadu tworzącego się w wyniku sedymentacji mikro-objektów.

Moim ważnym wynikiem jest analiza właściwości klas periodycznych ruchów względnych dla układów mikrocząstek opadających grawitacyjnie w płynie, oraz wpływu tych oscylacyjnych rozwiązań na dynamikę dla dowolnych położeń początkowych. Jak dotąd, dynamika układów wielu cząstek oddziałujących hydrodynamicznie nie została systematycznie przebadana nawet dla kluczowego z punktu widzenia podstaw teoretycznych zagadnienia trzech ciał. Wyniki uzyskane dla pewnych szczególnych przypadków pokazują, że dynamika ta ma bogatą strukturę matematyczną i w ogólności jest chaotyczna.

Wyzaczyłam teoretycznie pewne nowe klasy orbit okresowych i określiłam ich właściwości charakterystyczne, zarówno dla przybliżenia punktowego danego w postaci wyrażeń analitycznych [17,18,62] jak i numerycznie dla cząstek sferycznych [27,28,62] (we współpracy z dr P. Szymczakiem i studentem T. Gubcem [27], prof. B. U. Felderhofem [17,18] oraz sama [28,62]). Istotnym elementem tych prac jest systematyczne przebadanie stabilności rozwiązań periodycznych w oparciu o teorię Floqueta [17,18]. Wykazałam kluczową rolę ruchów periodycznych dla tworzenia przez cząstki długożyciowych zwartych grup [28,62].

Obliczenie czasu życia grup cząstek dla dużej statystyki względnych położeń początkowych pozwoliło na pokazanie jego silnej wrażliwości na niewielką zmianę warunku początkowego, w związku z rozpraszaniem chaotycznym [48,49].

Przeanalizowałam teoretycznie wpływ innych cząstek zawiesiny na ewolucję grupy i na charakterystyczny czas relaksacji, zarówno w układach regularnych, wykonujących oscylacje [17,18], jak i przypadkowych, o różnych początkowych korelacjach dwucząstkowych [16]. W tym celu wykonane zostały symulacje dla układów cząstek opadających pod wpływem grawitacji w płynie o periodycznych warunkach brzegowych. W ramach prostego modelu stwierdzone zostało numerycznie, że ewolucja zawiesiny opadającej grawitacyjnie i czas jej relaksacji do stanu stacjonarnego zależą od rozkładu początkowego par cząstek [16]. Ponadto pokazane zostało, że istnienie kolumnowych niestabilności w opadającej grawitacyjnie zawieszynie w istotny sposób zależy od jej struktury (korelacji wielocząstkowych) [17,18]. Uzyskane wyniki są istotne dla analizy opadania grawitacyjnego zawiesin niebrownowskich i zbadania ich struktury.

Byłam inicjatorem i kierownikiem projektu eksperymentalnego, który stanowił przedmiot pracy doktorskiej mgr S. Alabrudzińskiego. Moja rola polegała na analizie teoretycznej oddziaływań hydrodynamicznych między niewielką liczbą identycznych kul opadających w cieczy Stokesa i zaplanowaniu odpowiedniego układu doświadczalnego oraz zaproponowaniu pomiarów, których wyniki zostaną porównane z wynikami teoretycznymi uzyskanymi w przybliżeniu małych liczb Reynoldsa. Jednym z ciekawszych wyników tych badań eksperymentalnych są zarejestrowane oscylacje pewnych szczególnych konfiguracji względnych [25,26], należące do klas ruchów periodycznych, których właściwości badałam teoretycznie.

Od wielu lat przedmiotem moich badań jest proces opadania i rozpadu grup zawierających dużą liczbę przypadkowo rozmieszczonych cząstek [47,48,55,62] i uzasadnienie teoretyczne analogii z ewolucją kropeł gęstszej cieczy [19]. Obliczyłam uśrednioną po zespole statystycznym funkcję rozkładu dla cząstek przypadkowo położonych wewnątrz kulistego obszaru kropli zawiesiny, opadającej w tym samym płynie Stokesa pod wpływem grawitacji i porównałam

wynik teoretyczny z przeprowadzonymi wspólnie z prof. E. Guazzelli i doktorantem B. Metzgerem z Politechniki w Marsylii symulacjami [19]. Następnie wyniki te zostały przeze mnie wykorzystane do eksperymentalnego wyznaczenia prędkości opadania grup cząstek w lepkim płynie (we współpracy z doktorantami S. Alabrudzińskim i D. Chehata-Gomezem oraz przy wykorzystaniu laboratorium prof. T. A. Kowalewskiego [32]). W pracy tej przeprowadzona została analiza doświadczalna opadania grawitacyjnego grup bliskich cząstek w lepkim płynie (tworzących kropelki zawiesiny) i modelowanie teoretyczne ich prędkości średniej za pomocą opisu oddziaływań punktowych. Uzyskane wyniki stosują się do układów mikrocząstek opadających w środowisku wodnym i są potencjalnie ważne dla zastosowań medycznych, biologicznych i przemysłowych.

Analiza wpływu pionowej ściany na proces opadania i rozpadu grup zawierających dużą liczbę przypadkowo rozmieszczonych cząstek (czyli kropelki zawiesiny) stanowiła temat rozprawy doktorskiej przygotowanej pod moim kierunkiem przez mgr Annę Myłyk. Nasze wspólne publikacje [47,48,55] zawierają wyniki numeryczne uzyskane w ramach modelu cząstek punktowych (własne kody numeryczne) a także rezultaty doświadczeń. Zaletą modelu punktowego jest niezależność od promienia cząstki, co pozwala na łatwiejszą analizę kluczowych właściwości takich układów. Programy takie dotąd nie były w literaturze stosowane do analizy sedymentacji kropeł. Ich zastosowanie jest istotne dla analizy dynamiki układów wielocząstkowych i sformułowania kryteriów ich rozpadu. Pokazano, że w pobliżu ścianki kropelki szybciej się destabilizują, przebiegając krótszą drogę [47,48]. Okazało się także, że kropelki bliskie ścianki opadając oddalają się od niej [55]. Wyniki można wykorzystać do modelowania układów przemysłowych (systemy filtracyjne, produkcja cukru, zastosowania biomedyczne).

Moim najważniejszym wynikiem dotyczącym wielocząstkowych oddziaływań hydrodynamicznych w obecności pola grawitacyjnego jest określenie przyczyny deformacji kształtu grupy złożonej z wielu przypadkowo rozmieszczonych cząstek (hydrodynamiczne oddziaływanie z gubionymi stopniowo cząstkami, które jako wolniejsze pozostają coraz bardziej z tyłu za opadającą grupą) oraz mechanizmu rozpadu grupy (niestabilność dynamiki) [62]. W badaniach kropeł zawiesiny istotne jest porównanie wyników teoretycznych i numerycznych z przeprowadzonymi eksperymentami (zarejestrowane doświadczalnie ruchy periodyczne w grupach cząstek [25-26], sedymentacja kropeł zawiesiny o małej [32] i dużej [47-48] liczbie cząstek).

Podstawy teoretyczne multipolowej metody rozwiązania równań Stokesa

W wielu moich publikacjach stosowana była multipolowa metoda rozwiązań równań Stokesa dla przepływu lepkiego płynu w obecności zawieszonych w nim wielu cząstek i oparty na tej metodzie pakiet numeryczny HYDROMULTIPOLE. Zastosowany algorytm umożliwia osiągnięcie niezwykle wysokiej, ściśle kontrolowanej precyzji numerycznej. Pakiet HYDROMULTIPOLE jest obecnie najdokładniejszym i najbardziej wszechstronnym narzędziem numerycznym do analizy dynamiki niedeformowalnych mikrocząstek sferycznych w mikroprzepływach płynu w pobliżu jednej lub dwóch równoległych powierzchni rozdziału faz, lub też

mikrocząstek w układach gdzie wpływ ścianek jest zanedbywalny. Algorytm jest oparty na rozwinięciu multipolowym równań Stokesa, z uwzględnieniem poprawki na oddziaływania bliskich kul poprzez warstwę smarowania, która znacznie przyspiesza tempo zbieżności tego rozwinięcia. Zastosowanie odpowiedniej procedury uwzględniającej ściśle wyrażenia na przepływ w warstwie smarowania jest niezmiernie ważnym elementem algorytmu obliczeniowego, który umożliwia bardzo dokładne obliczenia przepływu w szczególności także pomiędzy bardzo bliskimi powierzchniami cząstek. Z drugiej strony, parametr obciążenia multipolowego jest kontrolowany i jego zmiany prowadzą do oszacowania dokładności numerycznej; w wielu przypadkach możliwa i celowa jest ekstrapolacja wyniku do wartości odpowiadającej nieskończonej liczbie multipoli.

Wspólnie z dr hab. E. Wajnrybem przeprowadziliśmy analizę zakresu stosowalności oraz dokładności obliczeń oddziaływania kuli przy ścianie z kwadratowym przepływem cieczy Stokesa, prowadzonych różnymi metodami numerycznymi [22]. Taka analiza porównawcza jest użytecznym testem numerycznym, potrzebnym w modelowaniu układów wielocząstkowych. Przygotowaliśmy także obszerną pracę monograficzną na temat podstaw teorii multipolowej rozwiązania równań Stokesa dla układów wielu cząstek unoszonych przez przepływy zewnętrzne i poddanych działaniu sił zewnętrznych [34].

Analiza osadzania białek na powierzchniach oraz wyznaczenie konformacji białek i DNA na podstawie właściwości hydrodynamicznych ich rozrzedzonej zawiesiny

Wysoka dokładność i wszechstronność multipolowego algorytmu rozwiązania równań Stokesa zainteresowała prof. Z. Adamczyka jako teoria potrzebna do opisu wyników eksperymentalnych uzyskiwanych w jego grupie dla białek i DNA. Przedmiotem naszej współpracy stało się opracowanie metody wyznaczenia pokrycia powierzchniowego cząstkami na podstawie pomiarów elektrokinetycznych prądu elektrycznego (przydatne dla takich zastosowań jak implanty i stenty). W ramach naszej współpracy najpierw obliczono teoretycznie i numerycznie opór hydrodynamiczny, jaki w przepływie ścinającym stawiają wydłużone cząstki stałe zaadsorbowanych na stałej powierzchni płaskiej. Obliczono opór w zależności od trójwymiarowej orientacji oraz wydłużenia cząstek. Pokazano, że opór hydrodynamiczny układów cząstek sferycznych zaadsorbowanych na powierzchni maleje, jeśli cząstki grupują się w płaskie struktury wydłużone ([30], współautorzy: K. Sadlej, E. Wajnryb). Wyniki są istotne dla zastosowań w układach medycznych i biologicznych.

Wyniki pracy [30] zostały użyte do obliczenia potencjału i prądu przepływu dla powierzchni kanału pokrytej przypadkowo rozłożonymi cząstkami sferycznymi. Wyniki te są istotne przy analizie procesów osadzania cząstek na powierzchniach (np. białek, polimerów, koloidów). Stanowią one podstawę nowej metody wyznaczenia nieznanego pokrycia powierzchniowego oraz konstrukcji nowych materiałów warstwowych o kontrolowanej strukturze (współpracownicy: Z. Adamczyk, E. Wajnryb, K. Sadlej, J. Bławzdziejewicz, M. Nattich) [31,46].

Kolejnym rozwiązaniem zagadnieniem jest obliczenie promieni hydrodynamicznych, współczynników dyfuzji oraz lepkości wewnętrznej cząsteczek o różnych kształtach (model „koralików”) [45,58]. Za pomocą kodów numerycznych HYDROMULTIPOLE obliczono współczynniki dyfuzji (promienie hydrodynamiczne) dla wydłużonych cząstek o ustalonej

długości, ale pozwijanych w płaskie struktury o różnych kształtach, w kontekście wykorzystania pomiarów dyfuzji aby uzyskać informacje na temat kształtu pozwijanych cząsteczek (współpracownicy: Z. Adamczyk, E. Wajnryb, K. Sadlej, P. Warszyński) [45]. Tematyka ta była kontynuowana w pracy [58], której celem było skonstruowanie modelu fibrynogenu i wyznaczenie jego konformacji tego białka na podstawie pomiarów współczynników dyfuzji translacyjnej i lepkości wewnętrznej jego rozrzedzonej zawiesiny. Obliczenie teoretyczne wartości obu tych współczynników wymagało jednak rozwiązania koncepcyjnego problemu teoretycznego - wyprowadzenia wyrażen na translacyjny współczynnik dyfuzji i brownowską lepkość wewnętrzną cząstek o dowolnym kształcie.

Translacyjne ruchy Browna i brownowska lepkość wewnętrzna cząstek o dowolnym kształcie

W układach koloidalnych, takich jak białka czy DNA w roztworze wodnym, podstawowe znaczenie ma średnie kwadratowe przemieszczenie cząsteczek wykonujących ruch Browna. Dla rozrzedzonych zawiesin dane jest ono liniową funkcją czasu, ze współczynnikiem dyfuzji proporcjonalnym do translacyjnej ruchliwości pojedynczej cząstki. Ruchy Browna poszczególnych punktów cząstki nieco różnią się od siebie, a różnice te stają się znaczące w przypadku cząstek o kształtach znacznie odbiegających od sferycznych lub od osiowo symetrycznych, co znajduje swoje odzwierciedlenie w znacznej zależności współczynnika ruchliwości od punktu odniesienia. Jak dotąd, nie było jasności, który z punktów cząstki należy przyjąć jako punkt referencyjny, aby obliczyć dyfuzję własną mierzoną eksperymentalnie w pomiarach rozproszenia światła. W pracy [56] podane zostało wyjaśnienie tego paradoksu. A mianowicie, teoretycznie uzasadniono, że dla czasów większych od charakterystycznej skali czasu rotacyjnej brownowskiej relaksacji (co jest warunkiem spełnionym w pomiarach rozproszonego światła), średnie przesunięcie kwadratowe staje się niezależne od wyboru punktu odniesienia, i w dodatku jest jednoznacznie wyznaczone przez ślad translacyjno-translacyjnej macierzy ruchliwości obliczony w układzie odniesienia związanym z „centrum ruchliwości” (w którym rotacyjno-translacyjna macierz ruchliwości jest symetryczna). Wyniki te mają istotne znaczenie przy obliczaniu dyfuzji własnej białek, DNA i innych brownowskich niesymetrycznych cząstek w roztworach wodnych (współautorzy: B. Cichocki, E. Wajnryb) [56].

W publikacji [57] (tych samych współautorów) podane zostały ogólne wyrażenia na zależną od częstości lepkość wewnętrzną zawiesin cząstek brownowskich o dowolnym kształcie. Wyprowadzenie teoretyczne opiera się na równaniu Smoluchowskiego. Jest to wynik ważny z punktu widzenia licznych zastosowań do układów koloidalnych o znaczeniu medycznym, biologicznym i chemicznym. Dotychczas bowiem w literaturze powszechnie stosowane były wyrażenia, które są słuszne jedynie dla zawiesin cząstek osiowo symetrycznych. Ich używanie do opisu zawiesin cząstek o dowolnym kształcie nie było uzasadnione. Natomiast lepkość wewnętrzna w istotny sposób zależy od kształtu cząstek. Wyprowadzone wyrażenia teoretyczne pozwalają zatem na wyznaczenie konformacji cząstek brownowskich na podstawie pomiaru lepkości efektywnej rozrzedzonej ich zawiesiny, czyli lepkości wewnętrznej [57]. Przykładem zastosowania wyprowadzonych w tej pracy ogólnych wyrażen teoretycznych jest eksperymentalne wyznaczenie konformacji fibrynogenu na podstawie pomiaru lepkości

rozrzedzonej zawiesiny tego białka [58].

Analiza dynamiki mikro-objektów unoszonych z płynem

Dynamika cząstek unoszonych przez przepływ Poiseuille'a w mikro-kanale, który modelowany jest jako dwie równoległe, płaskie, sztywne ścianki, przebadana została w publikacjach [29,39,40,50,53,54].

Praca [29] powstała w wyniku mojego zainteresowania wpływem dwóch warstw smarowania na ruchliwość dużych cząstek, niemal kompletnie wypełniających mikrokanal. Podane zostały jawne wyrażenia lubrykacyjne dla cząstki sferycznej poruszającej się w przepływie Poiseuille'a wzdłuż mikrokanalu niewiele szerszego niż jej średnica. Wyprowadzono proste wzory na współczynniki tarcia, siłę i moment siły wywierane przez przepływ na cząstkę nieruchomą oraz na prędkość cząstki swobodnej w zależności od położenia w mikro-kanale i przetestowano ich dokładność (współautorzy: E. Wajnryb, J. Bławdziewicz, F. Feuillebois) [29]. Wyniki mają znaczenie podstawowe dla układów cząstek w mikro-kanalach.

Obliczono także numerycznie z bardzo dużą dokładnością ruch mniejszej cząstki w przepływie Poiseuille'a między dwiema równoległymi ściankami i zaproponowano proste wzory przybliżone użyteczne w podstawowych technikach sortowania cząstek: fluid-flow-fractionation oraz chromatografii hydrodynamicznej. Wyniki numeryczne są istotne dla zastosowań w przemyśle chemicznym [50].

Badania dynamiki kropeł zawiesiny opadających grawitacyjnie skłoniły mnie do przebadania, jak krople zawiesiny deformują się gdy są unoszone przez przepływ, w nieobecności sił zewnętrznych. Za pomocą kodów numerycznych HYDROMULTIPOLE pokazano, że deformacja kształtu kropli zawiesiny w przepływie Poiseuille'a istotnie zmniejsza się i opóźnia wraz ze wzrostem ułamka objętościowego, przy czym kropla rozpada się na coraz mniejszą liczbę fragmentów zawierających coraz większe liczby cząstek (współpracownicy: K. Sadlej, E. Wajnryb) [40].

Opracowałam model teoretyczny ruchu mikro-włókien unoszonych przez przepływ Poiseuille'a wewnątrz mikro-kanalu. Model ten został następnie zaimplementowany numerycznie i zastosowany do obliczeń, które porównane zostały z analizą eksperymentalną tego procesu dla włókien, które zachowują swój kształt. Model ten można także rozszerzyć na opis ruchu innych wydłużonych mikro-cząstek w mikro-kanalach, co jest interesujące zwłaszcza dla deformowalnych włókien o znaczeniu biologicznym (współpracownicy: E. Wajnryb, K. Sadlej, D. Lamparska, T. Kowalewski) [39].

Nowym tematem, który od niedawna żywo mnie interesuje, jest badanie dynamiki i migracji giętkich włókien w mikro-kanale i wyznaczenie płaszczyzn ich akumulacji. Analiza dynamiki elastycznych mikrowłókien jest jednym z podstawowych zagadnień w nowoczesnych układach lab-on-chip, ważnym ze względu na różne zastosowania w biologii, medycynie i przemyśle. W pracy [53] zbadano zachowanie się włókien w kanale w obecności przepływu Poiseuille'a. Pokazano jak zmienia się charakter ruchu mikro-włókna w zależności od odległości od ściany kanału, współczynnika sztywności i długości włókna (współautorzy: dr A. Słowicka i dr hab. E. Wajnryb). Najbardziej jednak ciekawi mnie analiza procesu migracji włókien, która jest obecnie przedmiotem moich badań [54,63]. Powstaje bowiem ważne pytanie, czy zależność płaszczyzn akumulacji od giętkości i geometrii włókien może zostać wykorzystana do ich sortowania.

Ponadto analiza migracji włókien i ich kształtów wskazuje na istnienie różnych modów zarówno samej dynamiki, jak i akumulacji w określonych płaszczyznach. Stabilność tych modów istotnie zależy od stosunku tempa ścinania przepływu do współczynnika sztywności włókien. Istnienie takich modów dynamiki zostało w literaturze pokazane doświadczalnie dla wydłużonych cząstek o znaczeniu biologicznym.

Przeanalizowanie ruchu cząstki w osiowo symetrycznym ośrodku porowatym

Kolejny wynik moich badań to wspólne z prof. Cichockim opracowanie modelu teoretycznego samodyfuzji cząstki sferycznej w ośrodkach porowatych izotropowych i nieizotropowych. Model taki jest potrzebny aby za pomocą cząstki próbnej określać właściwości ośrodków przepuszczalnych. Zwłaszcza ciekawe są zastosowania do badania układów biologicznych, np. złożonych z wirusów fd [35]. Dla pewnego krytycznego ułamka objętościowego obserwowane jest bowiem przejście układu wirusów fd z fazy izotropowej do nematycznej. Dyfuzję własną cząstek w takich układach można badać w ramach zaproponowanego przez nas modelu, w którym cząstki są unoszone przez płyn poruszający się z prędkościami wyznaczonymi przez tensor Oseena (dla płynu Stokesa) lub tensor Greena dla ośrodka porowatego, czyli rozwiązanie fundamentalne równania Brinkmana-Debye-Bueche. W przypadku tym ruchliwość cząstek zadana jest wzorem analitycznym, co znacznie upraszcza rachunki. Pomiar współczynnika dyfuzji własnej cząstki w takim ośrodku i porównanie z wynikami teoretycznymi umożliwia wyznaczenie w ten sposób charakterystycznych parametrów ośrodka materii miękkiej. Nasze wyniki teoretyczne uzyskane dzięki ścisłej metodzie analizy modelu punktowego dla izotropowego ośrodka porowatego [35] mają dużą wartość, ponieważ zastępują znacznie mniej dokładne przybliżone numeryczne obliczenia.

Kontynuacją tej tematyki jest wyznaczenie funkcji Greena dla osiowo symetrycznego równania Debye-Bueche-Brinkmana, co otwiera drogę do modelowania numerycznego ruchu mikro-objektów w biologicznych zawiesinach cząstek o wydłużonych kształtach i wyróżnionej osi symetrii, np. nematyki (we współpracy z B. Cichockim) [36]. Szczególnie interesującym wynikiem jest znalezione przeze mnie jawne wyrażenie analityczne dla funkcji Greena w przypadku ośrodka o zerowym oporze hydrodynamicznym wzdłuż jednego wyróżnionego kierunku. Podobne właściwości ma np. ruch płynu wewnątrz drewna.

Zbadanie wpływu przepuszczalności ośrodka wewnątrz cząstek na ich dynamikę

Ostatni temat moich badań dotyczy właściwości zawiesin koloidalnych złożonych z cząstek przepuszczających płyn, a także cząstek składających się z porowatej otoczki i twardego rdzenia (we współpracy z prof. G. Nägele, prof. B. Cichockim, dr hab. E. Wajnrybem i dr G. Abade). Mikrocząstki i nano-cząstki o skomplikowanej wewnętrznej strukturze, zbudowane ze skłębionych polimerów zanurzonych w płynie, są przedmiotem intensywnych badań w wielu laboratoriach na świecie. Mikro-żele i nano-żele zmieniają w sposób istotny swoje rozmiary pod wpływem temperatury lub kwasowości, co pozwala na wykorzystanie ich w celu transportowania w swoim wnętrzu różnych substancji (np. leków). Opis teoretyczny podstawowych właściwości takich substancji ma więc duże znaczenie poznawcze i ścisły związek z praktycznymi zastosowaniami.

Najprostszym modelem mikro- czy też nano-żelu jest cząstka sferyczna o jednorodnym współczynniku przepuszczalności. Teoretycznie i numerycznie przebadaliśmy dynamikę i właściwości reologiczne zawiesiny takich cząstek. W szerokim zakresie ułamków objętościowych (nawet do 45%) wyznaczyliśmy lepkość efektywną [41-42], współczynniki translacyjnej dyfuzji własnej i kolektywnej oraz sedymentacji, a także funkcję hydrodynamiczną takiej zawiesiny [43,44] oraz współczynnik rotacyjnej dyfuzji własnej [51]. Wyniki mają znaczenie do analizy współczynników transportu zawiesin biologicznych i zawiesin innych cząstek złożonych ze skłębionych polimerów. W szczególności istotnym uproszczeniem są znalezione przeze mnie uniwersalne skalowania funkcji hydrodynamicznej.

Pomiary dyfuzji własnej są podstawowym narzędziem badań fizyków i chemików. Dlatego szczególnie przydatne są skonstruowane przeze mnie przybliżone, proste i użyteczne wyrażenia na współczynniki translacyjnej i rotacyjnej dyfuzji własnej nano- i mikro- cząstek sferycznych jednorodnie przepuszczających płyn, zawieszonych w ośrodku płynnym, słuszne w całym zakresie ułamków objętościowych aż do 45% [51]. Wyrażenia te uzyskałam na podstawie analizy wyników symulacji numerycznych wykonanych za pomocą kodów HYDROMULTIPOLE. Znalazłam interesujące uniwersalne skalowania współczynników translacyjnej i rotacyjnej dyfuzji własnej. W celu znalezienia tych skalowań wykorzystałam przeprowadzone wcześniej przez nas obliczenia wartości dwucząstkowych członów wirialnych dla tych współczynników [52]. W pracach [52] i [41] obliczyliśmy dwucząstkowe człony wirialne także dla współczynnika sedymentacji i lepkości efektywnej. Zaproponowaliśmy nowy model przybliżony opisu dynamiki cząstek przepuszczających wodę. W modelu tym cząstka składa się ze sztywnego rdzenia o mniejszym promieniu hydrodynamicznym oraz otoczki płynu o większym promieniu, spełniającej warunek nieprzenikania z innymi cząstkami.

Przedmiotem kolejnych prac [60,61] było wyznaczenie właściwości zawiesin koloidalnych złożonych z nieprzenikających się cząstek składających się z porowatej, przepuszczającej płyn otoczki i twardego rdzenia. Obliczono rozwinięcie wirialne współczynników sedymentacji, translacyjnej i rotacyjnej dyfuzji własnej oraz efektywnej lepkości dla takich cząstek. Wykonano symulacje równowagowe układów periodycznych zawiesin w całym zakresie, aż do 45%, ułamków objętościowych, wykorzystując pakiet obliczeniowy HYDROMULTIPOLE. Obliczono współczynniki sedymentacji, translacyjnej i rotacyjnej dyfuzji własnej oraz efektywnej lepkości dla zawiesin takich cząstek. Wyniki numeryczne zostały uzyskane dla szerokiego zakresu wartości przepuszczalności wnętrza cząstek oraz wielkości twardego rdzenia [60]. Określony został także prosty warunek określający, jak gruba i na ile nieprzepuszczalna musi być otoczka, aby rdzeń był praktycznie niewidoczny w pomiarach podanych wyżej współczynników.

W pracy [61] przeanalizowaliśmy dynamikę cząstek z twardym rdzeniem i cienką jednorodnie przepuszczalną otoczką. Obliczyliśmy współczynniki wirialne współczynników dyfuzji własnej, sedymentacji i lepkości efektywnej. Pokazaliśmy, że standardowo używany model efektywnych twardych sfer o promieniu takim jak rdzeń jest niedokładny. Skonstruowaliśmy znacznie dokładniejszy model efektywny, w którym cząstka o zewnętrznym promieniu b modelowana są jako twarda sfera o promieniu hydrodynamicznym, otoczona nieprzenikalną otoczką czystego płynu o zewnętrznym promieniu b . W granicy cienkiej otoczki model ten został ściśle wyprowadzony z równań teorii multipolowej.

Podsumowanie dorobku publikacyjnego

- 52 opublikowane autorskie recenzowane publikacje naukowe (w tym 50 z „listy filadelfijskiej”). Po uzyskaniu stopnia doktora habilitowanego 38 recenzowanych publikacji naukowych (w tym 36 z „listy filadelfijskiej”)
- Index Hirscha: 10
- Całkowita liczba cytowań: 329

Długoterminowe zagraniczne staże naukowe

- 1986/87 - pięciomiesięczne stypendium FOM, grupa fizyki statystycznej wysokich energii (Prof. Ch. G. van Weert), Institute of Theoretical Physics, Amsterdam University, Amsterdam, Holandia
- 1989/1990 - dziesięciomiesięczne stypendium Fulbrighta, grupa fizyki plazmy (Prof. A. N. Kaufman), Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, USA
- 1997/1998 - dwunastomiesięczne stypendium Francuskiego Ministerstwa Nauki i Edukacji, grupa fizyki zawieszin (Prof. F. Feuillebois) École, Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles, Paryż, Francja

Obecnie prowadzona międzynarodowa współpraca naukowa

- Współpraca z profesorem Francois Feuillebois z Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (LIMSI), wcześniej Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles (ESPCI), Francja, profesorem Antoine Sellier z Laboratoire d'Hydrodynamique (LadHyX) Ecole Polytechnique, skoncentrowana na efektywnych właściwościach zawiesziny koloidalnej oraz oddziaływaniach hydrodynamicznych między wieloma cząstkami przy liczbach Reynoldsa znacznie mniejszych od jedności.
- Współpraca z profesorem Gerhardem Naegele z Institute of Complex Systems, Soft Matter Division, Research Centre, Juelich, Germany, oraz doktorem Gustavo Coelho Abade, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brazylia, dotyczy właściwości zawieszin koloidalnych złożonych z cząstek przepuszczających płyn, także cząstek składających się z porowatej otoczki i twardego rdzenia, oraz quasi-dwuwymiarowych oddziaływań hydrodynamicznych.
- Współpraca z profesorem Janem Dhontem z Institute of Complex Systems, Soft Matter Division, Research Centre, Juelich, Germany, ma na celu stworzenie podstaw teoretycznych opisu nieizotropowych ośrodków przepuszczalnych, w kontekście badania dyfuzji małych cząstek w zawieszynie wirusów fd.
- Współpraca z profesorem Jerzym Bławdziewiczem z Texas Tech University, Lubbock, USA. dotyczy ruchu cząstek w pobliżu powierzchni międzyfazowych.

- Współpraca z Institute of Fluid Mechanics and Heat Transfer, Graz University of Technology, Graz, Austria (prof. Gunter Brenn, dr Meile) na temat dynamiki kropeł zawiesiny opadających grawitacyjnie w lepkim płynie (modelowanie teoretyczne, numeryczne i doświadczalne).

Granty - kierownictwo

MPNS COST Action MP1106 "Smart and green interfaces - from single bubbles and drops to industrial, environmental and biomedical applications", 05.2012-05.2016, uczestnik

Opus NCN nr 2011/01/B/ST3/05691 pt. „Hydrodynamika Płynów Złożonych”, 12.2011-12.2014, kierownik

Grant promotorski MNiSW 0493/B/T02/2011/40 „Dynamika układów wielocząstkowych opadających grawitacyjnie w lepkim płynie” 06.2011- 06.2012, kierownik

PICS “Hydrodynamic interactions in suspensions” (*Oddziaływania hydrodynamiczne cząstek zawiesiny*), realizowany w ramach współpracy polsko-francuskiej między PAN a Narodowym Ośrodkiem Badań Naukowych Francji (CNRS), 2009-2011, kierownik

COST Action P21 "Physics of droplets", 10.2006 - 10.2010, uczestnik

Projekt specjalny międzynarodowy niewspółfinansowany MNiSW pt. „Dynamika oddziaływań poruszających się mikroobiektów (cząstki, kropelki, pęcherzyki) z powierzchniami międzyfazowymi”, realizowany przez Instytut Katalizy i Fizykochemii Powierzchni PAN w Krakowie, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej oraz IPPT PAN jako projekt wspomagający COST Action P21 "Physics of droplets", 2007-2010, kierownik w IPPT PAN

MANAR „Nowe materiały warstwowe o kontrolowanej architekturze i funkcjonalności”, koordynowany przez Instytut Katalizy i Fizykochemii Powierzchni PAN w Krakowie, realizowany także przez Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych PAN w Łodzi, Instytut Odlewnictwa w Krakowie oraz Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, 2007, kierownik w IPPT PAN

Projekt badawczy 18316 „Ewolucja mikrostruktury sedymentującej zawiesiny”, realizowanego w ramach współpracy polsko-francuskiej między PAN a Narodowym Ośrodkiem Badań Naukowych Francji (CNRS), 2005-2008, kierownik

Projekt badawczy 14485 „Wpływ oddziaływań hydrodynamicznych na mikrostrukturę zawiesin”, realizowany w ramach współpracy polsko-francuskiej między PAN a Narodowym Ośrodkiem Badań Naukowych Francji (CNRS), 2003-2004, kierownik

``Microstructure of dispersive media'', kursy prowadzone przez profesorów: G. Nägele, R. B. Jones, B. U. Felderhof i F. Feuillebois, w ramach Centre of Excellence for Advanced Materials and Structures, 2003, organizator

Projekt badawczy 2727 „Transport, struktura i oddziaływanie cząstek w przepływie zawiesiny”, realizowany w ramach współpracy polsko-francuskiej między PAN a Narodowym Ośrodkiem Badań Naukowych Francji (CNRS), 1998-2002, kierownik

KBN GRANT 7 T07A 033 18 „Badanie oddziaływań kontaktowych pomiędzy dwiema sferami zanurzonymi w cieczy Stokesa”, 01.01.2000-31.12.2002, kierownik

KBN nr PB 2 0201 91 01 Modulowane fale elektromagnetycznych w relatywistycznej plazmie, 1991–1992, kierownik.

Konferencje

Ostatnio wygłosiłam zaproszone referaty na następujących konferencjach międzynarodowych:

IUTAM Symposium on Mobile Particulate Systems: Kinematics, Rheology and Complex Phenomena, Bangalore, India, 2012

IUTAM Symposium on Interactions for Dispersed Systems in Newtonian and Viscoelastic Fluid, Guanajuato, Mexico, 2006

Zorganizowałam międzynarodową konferencję *Microparticles in Stokes Flows - Symposium in Honor of François Feuillebois' 65th Birthday*, która odbyła się w 2011 roku w Warszawie (<http://microparticles2011.ippt.gov.pl>), i opracowałam jej program naukowy. Jestem redaktorem naukowym monografii (176 stron) zawierającej recenzowane artykuły prezentowane na tej międzynarodowej konferencji: *Microparticles in Stokes Flows - Symposium in Honor of François Feuillebois' 65th Birthday*, Journal of Physics: Conference Series, vol. 392 (2012).

DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWO-DYDAKTYCZNA

Opieka naukowa nad doktorantami

- dr Anna Myłyk, praca doktorska pt. *Dynamika układów wielocząstkowych opadających grawitacyjnie w lepkim płynie*, obrona w IPPT PAN w 2012 r., promotor
- dr Sławomir Alabrudziński, praca doktorska pt. *Badania eksperymentalne i interpretacja teoretyczna bliskich oddziaływań hydrodynamicznych w układach wielociałowych w zakresie małych liczb Reynoldsa*, obrona na Politechnice Warszawskiej w 2006 r., nieformalny opiekun naukowy (przed uzyskaniem stopnia doktora habilitowanego)
- mgr Marta Gruca (na I roku Studium Doktoranckiego IPPT PAN), opiekun naukowy

- mgr Marek Bukowicki (na I roku Studium Doktoranckiego IPPT PAN), opiekun naukowy

Wykłady i seminaria

- Wykład z mikrohydrodynamiki w ramach Studium Doktoranckiego IPPT PAN (uczestnicy: doktoranci i pracownicy IPPT PAN, a także studenci i doktoranci z kilku instytutów naukowych, wielu z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego), 2003/2004, 2004/2005, 2006/2007, 2008/2009, 2009/2010, 2012/2013
- Seminarium Zakładu Mechaniki i Fizyki Płynów IPPT PAN (2001-2007 r. prowadzenie, od 2010 r. do chwili obecnej - współprowadzenie)
- Ćwiczenia z metod matematycznych nauk przyrodniczych dla studentów IV roku kierunku Fizyka Szkoły Nauk Ścisłych PAN (1999/2000 i 2000/2001)
- Dwudziestogodzinny kurs specjalistyczny na temat oddziaływań hydrodynamicznych dla fizyków z kilku uczelni paryskich, Francja (1998)
- Ćwiczenia z różnych działów fizyki teoretycznej dla studentów Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (lata osiemdziesiąte)

Inna działalność edukacyjna

Sprawuję opiekę naukową nad studentami Wydziału Fizyki UW i innych uczelni oraz stypendystami Krajowego Funduszu na Rzecz Dzieci podczas praktyk w IPPT - 13 krótkoterminowych staży (od 2006) oraz 3 całoroczne (2011/2012 i 2012/2013). Współprowadzę pracę licencjacką pana Jakuba Nowakowskiego (Wydział Fizyki UW, 2013). Prowadziłam dwumiesięczne staże naukowe dwóch studentów Ecole Superieure de Physique et de Chimie Industrielles w Paryżu (1998 r.)

Przez dwie ostatnie kadencje jestem przewodniczącą Komisji Rady Naukowej IPPT PAN do spraw Kształcenia Młodej Kadry.

W latach 1995-2000 współprowadziłam Klub Odkrywców - 400 godzin zajęć z fizyki dla uczniów i nauczycieli prowadzonych metodą heurystyczną, częściowo w ramach Polskiego Towarzystwa Fizycznego (<http://www.ippt.gov.pl/~mekiel/EDU/CN>).

Jestem autorką lub współautorką 5 artykułów popularno-naukowych.

Przygotowałam program zajęć interakcyjnych na temat praw mikro-hydrodynamiki i pojęcia lepkości, a także koordynowałam szczegółowe opracowanie i realizację tych zajęć przez kilkunastoosobowy zespół z IPPT PAN podczas 14, 15 i 16 Pikników Naukowych w Warszawie

(w latach 2010, 2011 oraz 2012).

Jestem autorką 3 artykułów naukowych dotyczących edukacji [64-66]. Pierwszy z nich, opublikowany jako rozdział monografii wydanej w języku angielskim [64], zwraca uwagę na potrzebę dyskusji środowiska naukowego na temat metod skutecznego nauczania oraz na istotny wkład, jaki do reformy systemu nauczania mogą wnieść doktoranci i studenci. Omówiony jest tam przykład działań edukacyjnych, w których studenci i doktoranci uczą się poprzez przekazywanie innym swojej wiedzy i tworząc stronę internetową. Koncepcja takiej strony została przeze mnie stworzona i zrealizowana wspólnie z A. Myłk oraz uczestnikami wykładów i praktyk studenckich (hydro.ippt.pan.pl). Celem tej strony jest ułatwienie i opisanie procesu uczenia podstaw mikro-hydrodynamiki.

Drugi z moich artykułów naukowych poświęconych edukacji opublikowany został w języku polskim w piśmie naukowym na temat historii wychowania [65]. Dotyczy on analizy systemu kształcenia Komisji Edukacji Narodowej. W rozwijającym się systemie cel, zasady działania i procesy są sprzężone ze sobą i z ciągłym pogłębianiem wiedzy. Na podstawie analizy tych związków Wilson, Barsky i Daviss wyodrębnili uniwersalne kryteria oceny skuteczności zmian systemowych. Kryteria te można stosować zarówno do rozwijających się nowoczesnych technologii czy też nauki, jak i do reform edukacji. Celem tej pracy jest wykorzystanie tych kryteriów do analizy skuteczności reformy systemu nauczania przeprowadzonej przez Komisję Edukacji Narodowej (KEN). Pokazałam, na czym polegała spójność nadrzędnego celu kształcenia sformułowanego przez KEN, czyli gospodarczego i politycznego odrodzenia Polski, z przyjętymi zasadami wspólnoty celów, wolności myśli i rządów oraz własności wiedzy. Wskazałam, w jaki sposób KEN zapewniła stałą obecność sześciu procesów charakterystycznych dla rozwoju systemów: gromadzenia wiedzy potrzebnej do rozwoju systemu, tworzenia struktury i mechanizmów stymulujących stały wzrost kompetencji i ich przekazywanie, projektowania złożonych struktur lub obiektów, ciągłego doskonalenia jakości, rozpowszechniania innowacji i przeprojektowywania. W ten sposób zaprezentowałam na przykładzie, jak można przeprowadzić podobną ocenę skuteczności współczesnych inicjatyw dydaktycznych, programów, reform i systemów edukacyjnych, jako działanie istotnie różne od powszechnie obecnie stosowanej oceny poszczególnych uczniów i nauczycieli. Idąc śladem najlepszej polskiej tradycji edukacyjnej, przypominałam o potrzebie zastanowienia, na czym polega uczenie się naprawdę, czyli trwale i pożytecznie, oraz jaki powinien być nadrzędny cel kształcenia społeczeństwa XXI wieku.

Trzeci artykuł [66] dotyczy tradycji polskiej edukacji w okresie międzywojennym i zawiera opracowanie materiałów źródłowych jednej z bibliotek nauczycielskich i analizę jej roli w kształceniu nauczycieli. Artykuł ten jest częścią większego programu edukacyjnego, który realizuję we współpracy z Muzeum Ziemi Mińskiej w Mińsku Mazowieckim. Celem tych działań jest przygotowanie ekspozycji stałej, która dzięki pokazaniu tradycji nauczycielskich z okresu międzywojennego przyczyni się do ulepszenia współczesnych metod nauki szkolnej. W ramach tego programu zorganizowałam konkurs i wystawę (której jestem kuratorem) pt. „Nasi dziadkowie jako uczniowie i nauczyciele” (współpraca IPPT PAN z Muzeum Ziemi Mińskiej i Towarzystwem Przyjaciół Mińska Mazowieckiego). Wystawa będzie czynna w Muzeum Ziemi Mińskiej w okresie 22.11.2012-28.02.2013.

Więcej informacji na temat mojej działalności naukowo-badawczej i naukowo-dydaktycznej znajduje się w „Ankiecie oceny osiągnięć naukowych kandydata do tytułu profesora”.

LISTA RECENZOWANYCH ARTYKUŁÓW NAUKOWYCH WYMIENIONYCH W AUTOREFERACIE

- [1] M. L. Ekiel-Jeżewska,
Entropy Production in a Relativistic Multicomponent Gas,
Physica **109A**, 278 (1981).
- [2] M. Dudyński, M. L. Ekiel-Jeżewska,
Casuality of the Linearized Relativistic Boltzmann Equation,
Phys. Rev. Lett. **55**, 2831 (1985).
- [3] M. Dudyński, M. L. Ekiel-Jeżewska,
On the Linearized Relativistic Boltzmann Equation. I. Existence of Solutions,
Commun. Math. Phys. **115**, 607 (1988).
- [4] M. L. Ekiel-Jeżewska, Ł. A. Turski,
Relativistic Hydrodynamics,
Arch. Mech. **43**, 589 (1991).
- [5] M. Dudyński, M. L. Ekiel-Jeżewska,
Global Existence Proof for Relativistic Boltzmann Equation,
J. Stat. Phys. **66**, 991 (1992).
- [6] M. L. Ekiel-Jeżewska, T. Flå, A.N. Kaufman,
Modulated Electromagnetic Wave in Relativistic Plasma: Field and Kinetic Equations,
J. Plasma Phys. **53**, 185 (1995).
- [7] J. Bławdziewicz, M. L. Ekiel-Jeżewska,
How Shear Flow of a Semidilute Suspension Modifies its Self-Mobility,
Phys. Rev. E **51**, 4704 (1995).
- [8] B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, E. Wajnryb,
Lubrication corrections for three-particle contribution to short-time self-diffusion coefficients in colloidal dispersions,
J. Chem. Phys. **111**, 3265 (1999).
- [9] M. L. Ekiel-Jeżewska, F. Feuillebois, N. Lecoq, K. Masmoudi, R. Anthore, F. Bostel, E.

Wajnryb,

Hydrodynamic interactions between two spheres at contact,
Phys. Rev. E **59**, 3182 (1999).

[10] M. L. Ekiel-Jeżewska, N. Lecoq, R. Anthore, F. Bostel, F. Feuillebois,
Rotation due to hydrodynamic interactions between two spheres in contact,
Phys. Rev. E **66**, 051504 (2002).

[11] M. L. Ekiel-Jeżewska, N. Lecoq, R. Anthore, F. Bostel, F. Feuillebois,
Interactions between two close spheres in Stokes flow,
pp. 343-348 in: *Tubes, Sheets and Singularities in Fluid Dynamics*, eds.: K. Bajer, H. K. Moffatt,
Kluwer, Dordrecht, 2002.

[12] B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, P. Szymczak, E. Wajnryb,
Three-particle contribution to sedimentation and collective diffusion in hard-sphere suspensions,
J. Chem. Phys. **117**, 1231 (2002).

[13] B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, E. Wajnryb,
Three-particle contribution to effective viscosity of hard-sphere suspensions,
J. Chem. Phys. **119**, 606 (2003).

[14] B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, G. Nägele, E. Wajnryb,
Motion of spheres along a fluid-gas interface,
J. Chem. Phys. **121**, 2305 (2004).

[15] B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, G. Nägele, E. Wajnryb,
Hydrodynamic interactions between widely separated particles at a free surface,
Europhys. Lett. **67**, 383 (2004).

[16] M. L. Ekiel-Jeżewska, E. Wajnryb,
Relaxation time for sedimenting spheres of a suspension with periodic boundary conditions,
in: *ICTAM04 CD-ROM Proceedings*, ed. by W. Gutkowski and T. Kowalewski, IPPT PAN,
Springer, 2005.

[17] M. L. Ekiel-Jeżewska and B. U. Felderhof,
Periodic sedimentation of three particles in periodic boundary conditions,
Phys. Fluids **17**, 093102 (2005).

[18] M. L. Ekiel-Jeżewska and B. U. Felderhof,
Clusters of particles falling in a viscous fluid with periodic boundary conditions,
Phys. Fluids, **18**, 121502 (2006).

[19] M. L. Ekiel-Jeżewska, B. Metzger, and E. Guazzelli,
Spherical cloud of point particles falling in a viscous fluid,

Phys. Fluids **18**, 038104 (2006).

[20] M. L. Ekiel-Jeżewska and E. Wajnryb,
Equilibria for the relative motion of three heavy spheres in Stokes fluid flow,
Phys. Rev. E **73**, 046309 (2006).

[21] M. L. Ekiel-Jeżewska and E. Wajnryb,
Three-particle motion under gravity in Stokes flow: an equilibrium for spheres in contrast to "an end-of-world" for point particles,
Arch. Mech. **58**, 489-494 (2006).

[22] M. L. Ekiel-Jeżewska and E. Wajnryb,
Accuracy of the multipole expansion applied to a sphere in a creeping flow parallel to a wall,
Q. Jl Mech. Appl. Math. **59**, 563-585 (2006).

[23] M. T. Dudyński and M. L. Ekiel-Jeżewska,
The relativistic Boltzmann equation - mathematical and physical aspects,
J. Tech. Phys. **48**, 39-47 (2007).

[24] B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska and E. Wajnryb,
Hydrodynamic interactions between spheres in a viscous fluid with a flat free surface or hard wall,
J. Chem. Phys., **126**, 184704 (2007).

[25] S. Alabrudziński, M. L. Ekiel-Jeżewska, W. Suchecki, T. A. Kowalewski,
Metoda pomiaru ruchu malej grupy cząstek opadającej w cieczy,
str. 59-85 w monografii: *Wybrane zagadnienia przepływu płynów i wymiany ciepła*, W. Suchecki (red), Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2008.

[26] S. Alabrudziński, M. L. Ekiel-Jeżewska, T. A. Kowalewski, K. Urbaniec,
Badania eksperymentalne i interpretacja teoretyczna oddziaływań hydrodynamicznych grupy cząstek kulistych opadających w lepkiej cieczy,
str. 7-21 w monografii: *Wybrane zagadnienia mechaniki w budowie urządzeń technicznych*, D. Łodwik, J. Pietrzyk (red.), Politechnika Warszawska, Płock, 2008.

[27] M. L. Ekiel-Jeżewska, T. Gubiec, and P. Szymczak,
Stokesian dynamics of close particles,
Phys. Fluids, **20**, 063102 (2008).

[28] M. L. Ekiel-Jeżewska,
Periodic orbits of Stokesian dynamics,
Proceedings of the XXII International Congress on Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2008), J. Denier, M. Finn, T. Mattner (eds.), CD-ROM proceedings, 2008.

- [29] M. L. Ekiel-Jeżewska, E. Wajnryb, J. Bławdziewicz, and F. Feuillebois, *Lubrication approximation for microparticles moving along parallel walls*, J. Chem. Phys. **129**, 181102 (2008).
- [30] M. L. Ekiel-Jeżewska, K. Sadlej, and E. Wajnryb, *Friction of rod-like particles adsorbed to a planar surface in shear flow*, J. Chem. Phys. **129**, 041104 (2008).
- [31] K. Sadlej, E. Wajnryb, J. Bławdziewicz, M. L. Ekiel-Jeżewska, and Z. Adamczyk, *Streaming current and streaming potential for particle covered surfaces: Virial expansion and simulations*, J. Chem. Phys. **130**, 144706 (2009).
- [32] S. Alabrudziński, M. L. Ekiel-Jeżewska, D. Chehata-Gómez, and T. Kowalewski, *Particle clusters settling under gravity in a viscous fluid*, Phys. Fluids **21**, 073302 (2009).
- [33] M. L. Ekiel-Jeżewska and E. Wajnryb, *Hydrodynamic orienting of asymmetric microobjects under gravity*, J. Phys. Condens. Matter, **21**, 204102 (2009).
- [34] M. L. Ekiel-Jeżewska and E. Wajnryb, *Precise multipole method for calculating hydrodynamic interactions between spherical particles in the Stokes flow*, in: *Theoretical Methods for Micro Scale Viscous Flows*, eds.: Francois Feuillebois and Antoine Sellier, Transworld Research Network, pp. 127-172, 2009.
- [35] B. Cichocki and M. L. Ekiel-Jeżewska, *Self-diffusion of a sphere in an effective medium of rods*, J. Chem. Phys. **130**, 214902 (2009).
- [36] B. Cichocki, and M. L. Ekiel-Jeżewska, *Green tensors for Debye–Büchle–Brinkman equations generalized for axisymmetric medium*, J. Math. Phys. **51**, 103101-1--12 (2010).
- [37] J. Bławdziewicz, M. L. Ekiel-Jeżewska, and E. Wajnryb, *Hydrodynamic coupling of spherical particles to a planar fluid-fluid interface: Theoretical analysis*, J. Chem. Phys. **133**, 114703-1--11 (2010).
- [38] J. Bławdziewicz, M. L. Ekiel-Jeżewska, and E. Wajnryb, *Motion of a spherical particle near a planar fluid-fluid interface: The effect of surface incompressibility*, J. Chem. Phys. **133**, 114702-1--12 (2010).

- [39] K. Sadlej, E. Wajnryb, M. L. Ekiel-Jeżewska, D. Lamparska, T. A. Kowalewski, *Dynamics of nanofibres conveyed by low Reynolds number flow in a microchannel*, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **31**, 996–1004 (2010).
- [40] K. Sadlej, E. Wajnryb, and M. L. Ekiel-Jeżewska, *Hydrodynamic interactions suppress deformation of suspension drops in Poiseuille flow*, *J. Chem. Phys.* **133**, 054901-1--10 (2010).
- [41] G. C. Abade, B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, G. Nägele, and E. Wajnryb, *High-frequency viscosity and generalized Stokes-Einstein relations in dense suspensions of porous particles*, *J. Phys.: Condens. Matter* **22**, 322101-1--6 (2010).
- [42] G. C. Abade, B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, G. Nägele, and E. Wajnryb, *High-frequency viscosity of concentrated porous particles suspensions*, *J. Chem. Phys.* **133**, 084906-1--9 (2010).
- [43] G. C. Abade, B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, G. Nägele, and E. Wajnryb, *Short-time dynamics of permeable particles in concentrated suspensions*, *J. Chem. Phys.* **132**, 014503-1--17 (2010).
- [44] G. C. Abade, B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, G. Nägele, and E. Wajnryb, *Dynamics of permeable particles in concentrated suspensions*, *Phys. Rev. E* **81**, 020404-1--4 (2010).
- [45] Z. Adamczyk, K. Sadlej, E. Wajnryb, M. L. Ekiel-Jeżewska, P. Warszyński, *Hydrodynamic radii and diffusion coefficients of particle aggregates derived from the bead model*, *J. Colloid Interface Sci.* **347**, 192-201 (2010).
- [46] Z. Adamczyk, K. Sadlej, E. Wajnryb, M. Nattich, M. L. Ekiel-Jeżewska and J. Bławdziewicz, *Streaming potential studies of colloid, polyelectrolyte and protein deposition*, *Adv. Colloid Interface Sci.* **153**, 1-29 (2010).
- [47] A. Myłyk, M. L. Ekiel-Jeżewska, *How walls influence destabilization of a suspension drop settling under gravity in a viscous fluid?* *Colloids Surf. A* **365**, 109-111 (2010).
- [48] A. Myłyk, W. Meile, G. Brenn, and M. L. Ekiel-Jeżewska, *Break-up of suspension drops settling under gravity in a viscous fluid close to a vertical wall*, *Phys. Fluids* **23**, 063302-1--14 (2011).

- [49] M. L. Ekiel-Jeżewska and E. Wajnryb,
Lifetime of a cluster of spheres settling under gravity in Stokes flow,
Phys. Rev. E **83**, 067301-1--4 (2011).
- [50] L. Pasol, M. Martin, M. L. Ekiel-Jeżewska, E. Wajnryb, J. Bławdziewicz, and F. Feuillebois,
Motion of a sphere parallel to plane walls in a Poiseuille flow. Application to field-flow fractionation and hydrodynamic chromatography,
Chem. Eng. Sci. **66**, pp. 4078-4089 (2011).
- [51] G. C. Abade, B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, G. Nägele, and E. Wajnryb,
Rotational and translational self-diffusion in concentrated suspensions of permeable particles,
J. Chem. Phys. **134**, 244903-1--7 (2011).
- [52] B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, G. Nägele, and E. Wajnryb,
First-order virial expansion of short-time diffusion and sedimentation coefficients of permeable particles suspensions,
Phys. Fluids **23**, 083303-1--8 (2011).
- [53] A. M. Słowicka, M. L. Ekiel-Jeżewska, K. Sadlej, and E. Wajnryb,
Dynamics of fibers in a wide microchannel,
J. Chem. Phys. **136**, 044904-1--8 (2012).
- [54] A. M. Słowicka, E. Wajnryb, M. L. Ekiel-Jeżewska,
Migration of flexible fibers entrained by Poiseuille flow in a microchannel.
Proceedings of the Twenty Third International Congress on Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2012), Y. Bai, J. Wang, D. Fang (eds.), CD-ROM/USTick Proceedings, 2012.
- [55] M. L. Ekiel-Jeżewska and A. Myłyk,
Evolution of suspension drops settling under gravity in a viscous fluid near a vertical wall.
Proceedings of the Twenty Third International Congress on Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2012), Y. Bai, J. Wang, D. Fang (eds.), CD-ROM/USTick Proceedings, 2012.
- [56] B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, and E. Wajnryb,
Communication: Translational Brownian motion for particles of arbitrary shape,
J. Chem. Phys. **136**, 071102-1--4 (2012).
- [57] B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, and E. Wajnryb,
Intrinsic viscosity for Brownian particles of arbitrary shape,
J. Phys.: Conf. Ser. **392**, 012004, (2012).
- [58] Z. Adamczyk, B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, A. M. Słowicka, E. Wajnryb, and M. Wasilewska,
Fibrinogen conformations and charge in electrolyte solutions derived from DLS and dynamic

viscosity measurements,
J. Colloid Interface Sci., **385**, 244-257 (2012).

[59] B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, G. Nägele, E. Wajnryb,
Hydrodynamic Interactions Between Solid Particles at a Fluid-Gas Interface,
in: *Drops and Bubbles in Contact with Solid Surface*, eds. Ferrari M., Liggieri L., Miller R., CRC
Press, Leiden, pp. 93-104, 2012.

[60] G. C. Abade, B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, G. Nägele, and E. Wajnryb,
Diffusion, sedimentation, and rheology of concentrated suspensions of core-shell particles,
J. Chem. Phys. **136**, 104902-1--16 (2012).

[61] B. Cichocki, M. L. Ekiel-Jeżewska, and E. Wajnryb,
*Short-time dynamics and high-frequency rheology of suspensions of spherical core-shell
particles with thin-shells*,
Colloids Surf. A, **418**, 22-28 (2013).

[62] M. L. Ekiel-Jeżewska,
Swarms of particles settling under gravity in a viscous fluid,
<http://arxiv.org/abs/1209.1834> (wysłane do Phys. Fluids)

[63] A. M. Słowicka, E. Wajnryb, M. L. Ekiel-Jeżewska,
Lateral migration of flexible fibers in Poiseuille flow between two parallel planar solid walls
<http://arxiv.org/abs/1208.2418> (po pozytywnych recenzjach w EPJE)

Artykuły naukowe dotyczące edukacji

[64] M. L. Ekiel-Jeżewska,
Experimenting with teaching contexts,
in: T. Marek, W. Karwowski, M. Frankowicz, J. Kantola, P. Zgaga (eds.), *Human Factors of a
Global Society: a System of Systems Perspective*, CRC Press, Taylor & Francis, in print, (2013),
ISBN-10: 1466572868, ISBN-13: 978-1466572867.

[65] M. L. Ekiel-Jeżewska,
System kształcenia Komisji Edukacji Naukowej,
Rozprawy z dziejów oświaty, tom **XLIX**, 55-110 (2012).

[66] M. L. Ekiel-Jeżewska,
Odnalezione akta Biblioteki Powiatowego Oddziału ZNP w Mińsku Mazowieckim,
Rocznik Mińskomazowiecki, **18**, 124-135 (2010).

