



Rekrutacja do Szkoły Doktorskiej w Uniwersytecie Śląskim w Katowicach na rok akademicki 2026/2027

Admission to the Doctoral School at the University of Silesia in Katowice for academic year 2026/2027

Nauki fizyczne temat nr 1	Physical sciences topic No. 1
Analiza nieliniowej i wieloskalowej dynamiki kanałów jonowych z wykorzystaniem metod fizyki statystycznej, analizy sygnałów i uczenia maszynowego	Analysis of Nonlinear and Multiscale Dynamics of Ion Channels Using Methods of Statistical Physics, Signal Analysis, and Machine Learning
PhD supervisor: dr hab. Łukasz Machura, prof. UŚ	
Krótką charakterystyka założeń i celów badawczych Kanały jonowe to wyspecjalizowane białka błonowe, odpowiedzialne za selektywny transport jonów i prawidłową sygnalizację komórkową. Ich dysfunkcja zaburza podstawowe procesy fizjologiczne i jest przyczyną wielu chorób. Jednym z obszarów badań fizyków teoretycznych jest analiza mechanizmów bramkowania oraz funkcjonalnej dynamiki kanałów jonowych. Realizacja tego celu wymaga integracji podejść wywodzących się z fizyki statystycznej, zaawansowanej analizy sygnałów oraz modeli teoretycznych opisujących dynamikę przejść między stanami funkcjonalnymi kanałów jonowych. Mimo znaczącego postępu w badaniach mechanizmów kanałowego gatingu, wiele aspektów przejść pomiędzy stanami zamkniętym a otwartym pozostaje słabo poznanych. Niejasny pozostaje również wpływ ligandów i leków – czy oddziałują one poprzez stabilizację określonych stanów konformacyjnych, czy też modyfikację dynamiki samych przejść. Dane eksperymentalne uzyskiwane metodą patch-clamp charakteryzują się wysoką złożonością oraz poziomem szumu, a także nieliniowym charakterem procesu gatingu, co stanowi poważne wyzwanie analityczne. Sekwencje patch-clamp wykazują liczne cechy nieliniowe, w tym obecność korelacji długozasięgowych oraz odstępstwa od	Brief description of research assumptions and goals Ion channels are specialized membrane proteins responsible for selective ion transport and proper cellular signaling. Their dysfunction disrupts fundamental physiological processes and is the cause of numerous diseases. One of the research areas of theoretical physics focuses on the analysis of gating mechanisms and the functional dynamics of ion channels. Achieving this goal requires the integration of approaches derived from statistical physics, advanced signal analysis, and theoretical models describing the dynamics of transitions between functional states of ion channels. Despite significant progress in the study of channel gating mechanisms, many aspects of the transitions between closed and open states remain poorly understood. In particular, the influence of ligands and drugs is still unclear—whether they act primarily through stabilization of specific conformational states or by modifying the dynamics of the transitions themselves. Experimental data obtained using the patch-clamp technique are characterized by high complexity, substantial noise levels, and the nonlinear nature of the gating process, which together pose a major analytical challenge. Patch-clamp time series exhibit numerous nonlinear features, including the presence of long-range correlations and deviations from classical statistical distributions describing





klasycznych rozkładów statystycznych opisujących czasy przebywania w określonych stanach funkcjonalnych. Głównym celem pracy będzie analiza dynamiki tych sekwencji poprzez połączenie: (i) zaawansowanej analizy czasowo-częstotliwościowej opartej na Nonlinear Mode Decomposition, (ii) metod analizy sekwencji ukierunkowanych na identyfikację wzorców aktywności, wykorzystujących sieci neuronowe; (iii) wyznaczenia zestawu cech opisujących sygnały w kategoriach ich własności statystycznych oraz złożonej dynamiki nieliniowej, obejmującej pamięć długozasięgową oraz cechy charakterystyczne dla procesów chaotycznych, takie jak skalowanie fluktuacji i multifraktalność. Takie podejście umożliwi uchwycenie zarówno regularnych aspektów dynamiki, jak i niestacjonarnej, wieloskalowej struktury badanych sygnałów. Przedstawione synergiczne podejście pozwoli na poprawę interpretowalności sygnałów patch-clamp, skuteczniejsze wykrywanie funkcjonalnych stanów kanałów jonowych oraz automatyczną i skalowalną analizę. W konsekwencji główne cele pracy obejmują: (i) pogłębione poznanie mechanizmów bramkowania oraz funkcjonalnego zachowania kanałów jonowych; (ii) rozwój bardziej precyzyjnych strategii badawczych dotyczących dynamiki złożonych struktur kanałów jonowych; (iii) automatyzację oraz zwiększenie dokładności i przejrzystości analizy danych eksperymentalnych opisujących aktywność kanałów jonowych.

residence times in specific functional states. The main objective of this project is to analyze the dynamics of these sequences by combining: (i) advanced time–frequency analysis based on Nonlinear Mode Decomposition, (ii) sequence analysis methods aimed at identifying activity patterns using neural networks, and (iii) the extraction of a feature set describing the signals in terms of their statistical properties and complex nonlinear dynamics, including long-range memory and characteristics typical of chaotic processes, such as fluctuation scaling and multifractality. This approach enables the capture of both regular dynamical features and the nonstationary, multiscale structure of the analyzed signals. The proposed synergistic framework will improve the interpretability of patch-clamp signals, enable more effective detection of functional states of ion channels, and facilitate automated and scalable data analysis. Consequently, the main objectives of the project include: (i) gaining deeper insight into gating mechanisms and the functional behavior of ion channels, (ii) developing more precise research strategies for studying the dynamics of complex ion channel structures, and (iii) automating and increasing the accuracy and transparency of experimental data analysis related to ion channel activity.

Planowany wkład w rozwój dyscypliny

Planowane badania zakładają opracowanie interdyscyplinarnego podejścia do analizy dynamiki kanałów jonowych, łączącego narzędzia fizyki statystycznej z zaawansowanymi metodami analizy sygnałów oraz uczenia maszynowego. Takie podejście umożliwi interpretowalny opis nieliniowych i losowych przejść pomiędzy stanami zamkniętym i otwartym kanału, czyli mechanizmów bramkowania, które stanowią fundamentalny element funkcjonowania tych układów z punktu widzenia fizyki procesów stochastycznych. Aktywność prądowa kanałów jonowych charakteryzuje się obecnością szumu typu $1/f$ na

Planned contribution to the development of the discipline

The planned research aims to develop an interdisciplinary approach to the analysis of ion channel dynamics, integrating tools from statistical physics with advanced signal processing and machine learning techniques. This framework enables an interpretable description of nonlinear and stochastic transitions between the closed and open states of ion channels, i.e., gating mechanisms, which constitute a fundamental aspect of their operation from the perspective of stochastic process physics. The ionic current activity of ion channels is characterized by the presence of $1/f$ noise in the





widmie mocy, który jest zjawiskiem powszechnym w wielu układach fizycznych i biofizycznych o złożonej dynamice i pozostaje przedmiotem intensywnych badań w fizyce materii skondensowanej oraz fizyce układów nieliniowych. W kontekście kanałów jonowych mechanizmy odpowiedzialne za powstawanie takiej charakterystyki spektralnej nie są jednoznacznie wyjaśnione. Wśród potencjalnych źródeł wymienia się m.in. istnienie stanów pośrednich, wolne zmiany konformacyjne białka kanału oraz złożone interakcje pomiędzy jonami a strukturą kanału.

Procesy te zachodzą na wielu skalach czasowych i wykazują cechy niestacjonarności, korelacji długozasięgowych oraz dynamiki nieliniowej, co czyni ich opis szczególnie trudnym w ramach klasycznych modeli Markowa. Zastosowanie kompleksowej analizy, łączącej metody czasowo-częstotliwościowe, analizę wieloskalową oraz narzędzia uczenia maszynowego, pozwoli na identyfikację dominujących mechanizmów fizycznych odpowiedzialnych za obserwowaną dynamikę oraz charakter szumu $1/f$.

Oczekiwanym wkładem pracy w rozwój fizyki będzie pogłębienie rozumienia uniwersalnych mechanizmów generujących złożoną dynamikę w otwartych układach stochastycznych, a także dostarczenie nowych narzędzi do analizy wieloskalowych procesów nieliniowych, które mogą znaleźć zastosowanie również w innych obszarach fizyki, takich jak fizyka miękkiej materii, biofizyka czy teoria układów złożonych.

power spectrum—a phenomenon commonly observed in many physical systems with complex dynamics and a subject of extensive research in condensed matter physics and nonlinear physics. In the context of ion channels, the mechanisms responsible for this spectral behavior are not yet fully understood. Potential sources include the existence of intermediate states, slow conformational changes of the channel protein, and complex ion–channel interactions.

These processes occur across multiple time scales and exhibit nonstationarity, long-range correlations, and nonlinear dynamics, making them particularly challenging to describe within classical Markovian models. The application of a comprehensive analytical framework combining time–frequency methods, multiscale analysis, and machine learning tools will allow for the identification of dominant physical mechanisms underlying the observed dynamics and the emergence of $1/f$ noise.

The expected contribution of this work to the field of physics lies in advancing the understanding of universal mechanisms responsible for complex dynamics in open stochastic systems, as well as in providing new tools for the analysis of multiscale nonlinear processes that may also be applicable to other areas of physics, such as soft matter physics, biophysics, and the theory of complex systems.

Opis wymagań – wiedza, umiejętności i kompetencje społeczne kandydata

Kandydat powinien posiadać ugruntowaną wiedzę z zakresu fizyki statystycznej, teorii procesów stochastycznych oraz biofizyki molekularnej. Kluczowe jest zrozumienie dynamiki Browna, równań Langevina oraz mechanizmów transportu jonowego w kanałach białkowych, co umożliwi pogłębioną interpretację wyników uzyskiwanych na podstawie analizowanych sekwencji danych eksperymentalnych.

Wymagana jest biegłość w programowaniu naukowym w języku Python oraz umiejętność implementacji algorytmów numerycznych.

Description of requirements – knowledge, skills and social competences of the candidate

The candidate should possess a solid background in statistical physics, the theory of stochastic processes, and molecular biophysics. A thorough understanding of Brownian dynamics, Langevin equations, and ion transport mechanisms in protein channels is essential for the in-depth interpretation of results obtained from experimental data analysis.

Proficiency in scientific programming using Python and the ability to implement numerical algorithms are required. Experience with CUDA architecture for optimizing computations on graphical





Istotnym atutem będzie doświadczenie w pracy z architekturą CUDA w celu optymalizacji obliczeń na procesorach graficznych (GPU), a także znajomość zaawansowanych metod analizy szeregów czasowych, obejmujących ekstrakcję sygnału z szumu, statystyczną walidację modeli względem danych eksperymentalnych oraz zastosowanie metod sztucznej inteligencji do analizy danych sekwencyjnych.

Od kandydata oczekuje się wysokiego poziomu samodzielności badawczej, determinacji w rozwiązywaniu złożonych problemów obliczeniowych oraz zdolności do pracy na pograniczu różnych dyscyplin naukowych. Niezbędna jest również umiejętność klarownej komunikacji naukowej w języku angielskim, a także dbałość o rzetelność i transparentność metodologiczną, zgodnie z zasadami otwartej nauki oraz odtwarzalności wyników badań.

processing units (GPUs) will be considered a strong asset, as will familiarity with advanced time series analysis methods, including signal extraction from noise, statistical validation of models against experimental data, and the application of artificial intelligence techniques to sequential data analysis. The candidate is expected to demonstrate a high level of research independence, determination in solving complex computational problems, and the ability to work at the interface of multiple scientific disciplines. Strong scientific communication skills in English are required, along with a commitment to methodological rigor and transparency, in accordance with the principles of open science and reproducibility of research results.

