

# Projekt – dr hab. Krzysztof Cichy

## Struktura wewnętrzna nukleonów z chromodynamiki kwantowej na sieci z fermionami twisted mass

grant SONATA BIS nr 2016/22/E/ST2/00013

### Streszczenie projektu

Wiadomo, że składniki jądra atomowego, protony i neutrony (nazywane razem nukleonami), mają wewnętrzną strukturę. Składają się one z cząstek elementarnych, kwarków, które są związane przez gluony. Oddziaływania tych cząstek, zwane silnymi, i budowa nukleonów są opisane przez teorię chromodynamiki kwantowej (QCD). Wynikają z niej kluczowe własności całej materii jądrowej, włączając w to fizykę bardzo wczesnego Wszechświata, jądra Słońca lub gwiazd neutronowych.

Głównym celem projektu jest lepsze zrozumienie wewnętrznej struktury nukleonów za pomocą numerycznych metod QCD na sieci z użyciem tzw. dyskretyzacji twisted mass fermionów. Nasza wiedza dotycząca ich struktury wyrażona jest tzw. funkcjami rozkładu, w szczególności funkcjami rozkładu partonów (ang. *parton distribution functions* – PDF) i uogólnionymi funkcjami rozkładu (ang. *generalized parton distributions* – GPD). Funkcje te mogą być otrzymane poprzez fitowanie danych eksperymentalnych, ale są też, w zasadzie, obliczalne teoretycznie z lagranżjanu QCD. Ze względu jednak na ich nieperturbacyjną naturę, stanowi to bardzo trudne zadanie. Jedyną znaną metodą uzyskania ilościowych rezultatów w nieperturbacyjnym reżimie QCD jest sformułowanie tej teorii na euklidesowej sieci i numeryczne obliczenie odpowiednich całek po trajektoriach na superkomputerach, z użyciem algorytmów Monte Carlo. Jednakże, przez wiele lat na sieci udawało się obliczyć jedynie momenty PDFów i GPD, wyrażalne za pomocą elementów macierzowych operatorów lokalnych. Pełne obliczenie PDFów/GPD okazywało się niemożliwe, ze względu na to, że ich definicja na stożku świetlnym wymagałaby dostępu do zerowych odległości czasoprzestrzennych na sieci. W 2013 roku Ji zaproponował jednak nową metodę, w której zamiast odpowiednich funkcji oblicza się tzw. quasi-funkcje, wyrażone poprzez czysto przestrzenne korelacje, co pozwala uniknąć wspomnianego wyżej problemu. Quasi-PDFy i quasi-GPD mogą być następnie dopasowane (matching) do fizycznych PDFów/GPD, których poszukujemy.

W naszych wstępnych badaniach potwierdziliśmy, że podejście Ji jest wykonalne z obliczeniowego punktu widzenia i naszym kolejnym celem jest pełne wyznaczenie tą metodą kwarkowych PDFów i GPD. Główną hipotezą badawczą jest, że takie obliczenie jest możliwe przy w pełni kontrolowanych wszystkich źródłach

efektów systematycznych, w szczególności z pełną procedurą nieperturbacyjnej renormalizacji. Zastosujemy podejście QCD na sieci z dyskretyzacją twisted mass fermionów. Użyjemy generowanych przez European Twisted Mass Collaboration (ETMC) konfiguracji pól cechowania, przy dwóch wartościach stałej sieci, dwóch objętościach i z fizyczną masą pionu. Pozwoli to na pełną analizę efektów systematycznych. Obliczenia wykonane będą na największych europejskich superkomputerach, do których ETMC ma stały dostęp. Projekt oparty będzie na metodzie Ji. Obliczymy elementy macierzowe konieczne do wyznaczenia quasi-PDFów, które poddamy procedurze matchingu, aby otrzymać fizyczne PDFy i GPD. Zastosujemy poprawki ze względu na masę nukleonu i skończoną wartość jego pędu. Wyznamy też nieperturbacyjnie odpowiednie stałe renormalizacyjne.

Projekt będzie miał znaczący wpływ na nasze rozumienie struktury nukleonów, odpowiedzialnych za niemal całą masę widzialnej materii. Obliczane PDFy/GPD są danymi wejściowymi w przewidywaniach teoretycznych dla eksperymentów w LHC. Nasza analiza doprowadzi do redukcji niepewności tych przewidywań opartych na funkcjach otrzymanych z fitów.

# Nucleon structure from lattice QCD with twisted mass fermions

grant SONATA BIS no. 2016/22/E/ST2/00013

## Project abstract

We know that the constituents of the atomic nucleus, the protons and neutrons (collectively called nucleons), have an inner structure. They consist of elementary particles, the quarks, which are held together by gluons. The interaction of these particles and the way how the nucleons are built is described by the theory of quantum chromodynamics (QCD). QCD can unravel the essential features of all nuclear matter, including the very early universe, the core of the sun and the physics of neutron stars.

The main objective of the research project is to achieve better theoretical understanding of the internal structure of the nucleons, using numerical methods of Lattice QCD. Our knowledge concerning this structure is summarized in the so-called distribution functions, in particular the parton distribution functions (PDFs) and generalized parton distributions (GPDs). These functions can be obtained by fitting experimental data, but they are, in principle, computable theoretically. Given the non-perturbative nature of the PDFs and GPDs, this is a difficult task. The only known way to obtain controllable quantitative results for the non-perturbative regime

of QCD is its formulation on the lattice and evaluation of the relevant path integrals numerically, using Monte Carlo algorithms implemented for world's largest supercomputers. This approach is called Lattice QCD (LQCD). However, for many years, LQCD physicists have only been able to compute the low moments of the PDFs/GPDs, which are accessible from matrix elements of local operators. The full computation of PDFs/GPDs on the lattice remained elusive, as they are defined on the light-cone and hence require going to effectively zero spacetime intervals. In 2013, a new method was suggested by Ji to evaluate a different kind of object, the so-called quasi-distribution function, which is defined from purely spatial correlations and hence avoids the above problem. The quasi-PDF/GPD can then be matched to the true PDF/GPD via a known matching procedure.

We have already confirmed the computational feasibility of this approach and our aim in the proposed project is to perform a full lattice investigation of quark PDFs/GPDs. Our main research hypothesis is that such computation is possible with all sources of systematic effects under control, in particular with proper non-perturbative renormalization.

We will use the lattice approach to QCD with the twisted mass discretization of fermions. We will profit from the currently generated gauge field configurations by the European Twisted Mass Collaboration (ETMC), at two values of the lattice spacing, two values of the volume and, most importantly, with the physical pion mass. These state-of-the-art configurations will allow for a reliable analysis of all related systematic effects. Computations will be performed on Europe's largest supercomputers, to which ETMC has constant access. From the theoretical perspective, calculations will be based on the method proposed by Ji. We will compute the matrix elements relevant for the evaluation of quark quasi-PDFs/GPDs. The latter will be matched to physical PDFs/GPDs and nucleon mass corrections and finite momentum corrections will be applied. We will also compute the relevant renormalization constants non-perturbatively.

The proposed project will have a significant impact on our understanding of the structure of nucleons, which are responsible for almost all the mass of visible matter. The computed objects, PDFs and GPDs, are input data to theoretical predictions for the LHC scattering experiments. Our computation may significantly lower some of the related uncertainties that come from current phenomenological fits.