

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2016/25



ZAKLJUČNO POROČILO RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

A. PODATKI O RAZISKOVALNEM PROJEKTU

1. Osnovni podatki o raziskovalnem projektu

Šifra projekta	N1-0020
Naslov projekta	Študij čarmoniju podobnih stanj v kromodinamiki na mreži
Vodja projekta	15643 Saša Prelovšek Komelj
Tip projekta	N Projekti ESF in ERC
Obseg raziskovalnih ur	1349
Cenovni razred	D
Trajanje projekta	10.2013 - 09.2015
Nosilna raziskovalna organizacija	1554 Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko
Raziskovalne organizacije - soizvajalke	
Raziskovalno področje po šifrantu ARRS	1 NARAVOSLOVJE 1.02 Fizika
Družbeno-ekonomski cilj	13.01 Naravoslovne vede - RiR financiran iz drugih virov (ne iz SUF)
Raziskovalno področje po šifrantu FOS	1 Naravoslovne vede 1.03 Fizika

B. REZULTATI IN DOSEŽKI RAZISKOVALNEGA PROJEKTA

2. Povzetek raziskovalnega projekta¹

SLO

Eksperimentalno je bilo v zadnjem desetletju odkrita vrsta ne-konvencionalnih stanj podobnih čarmoniju $\bar{c}c$. Mnoga izmed njih, predvsem nabita stanja, ne morejo predstavljati običajenega čarmonija $\bar{c}c$. Zanimiva stanja se nahajajo blizu praga za močni razpad ali pa so hadronske resonance nad pragom. Primeri ne-konvencionalnih stanj so tetrakvarki, pentakvarki in mezonske molekule.

Pred začetkom projekta nobeno od teh stanj ni bilo teoretično pravilno obravnavano s kromodinamiko na mreži. To je edina neperturbativna metoda, ki temelji neposredno na osnovni teoriji močne interakcije. Ob začetku projekta so bile zanesljivo izračunane le mase stanj, ki so precej pod pragom.

S kromodinamiko na mreži smo simulirali zanimiva stanja čarmonija in čarmoniju-podobna stanja, ter nekatere druge hadrone s kvarkoma c ali b. Osredotočili smo se na stanja blizu praga in prvič upoštevali vpliv praga. Pri resonancah smo prvič upoštevali njihov močni razpad in določili razpadno širino. To smo dosegli z simulacijo sipanja dveh hadronov v relevantnih kanalih in določitvijo sipalne matrike.

Predstavili smo prvi dokaz za obstoj zanimivega čarmoniju-podobnega stanja $X(3872)$ s kromodinamiko na mreži. Stanje smo našli v dinamični simulaciji sipanja DD^* v kanalu z $J^{PC}=1^{++}$ in izospinom 0. Malce pod pragom DD^* smo namreč našli v sipalni matriki pol in njegov obstoj povezali z $X(3872)$. Ugotovili smo, da so za $X(3872)$ ključne Fockove komponente $\bar{c}c$ in DD^* , komponente dikvark-antikvark pa so manj pomembne.

Pri simulaciji sipanja DK smo našli pol pod pragom in ga povezali z skalarnim mezonom $Ds_0(2317)$. Pri sipanju D^*K pa smo pol povezali z aksialnim mezonom $Ds_1(2460)$. Ugotovili smo, da vpliv pragov zniža maso mezonov, ki se naposled ujemajo z izmerjenimi.

Napovedali smo masi skalarnega mezona Bs_0 in aksialnega mezona Bs_1 , ki eksperimentalno še nista bila odkrita.

Predstavili smo prvo študijo čarmonijevih resonanc, ki upošteva njihove močne razpade. Dobljena razpadna širina in masa najlažje vektorske resonance $\psi(3770)$ se zadovoljivo ujemata z izmerjenimi. Preučili smo tudi kanal relevanten za skalarne čarmonijeve resonance saj ni znano katero eksperimentalno stanje naj bi jim ustrezalo.

Določili smo diskretni energijski spekter v kanalu z $J^{PC}=1^{+-}$, kjer so bili v eksperimentu opaženi vrhovi poimenovani Z_c . Lastnega stanja, ki bi bilo lahko kandidat za eksotični Z_c^+ (3900) z strukturo $\bar{c}c u \bar{d}$ nismo odkrili. Rezultati se zdijo v skladu z rezultati skupine HALQCD, ki nakazujejo da Z_c^+ ni navadna resonanca, temveč posledica močne sklopitve med kanalom J/ψ - π in $D-D^*$.

V simulacijah smo kreirali oziroma anihilirali fizikalna z velikim številom operatorjev oblike kvark-antikvark, mezon-mezon in dikvark-antikvark. Korelacijske matrike smo izračunali z polno ali stohastično distilacijo. Iz energijskega spektra smo določili energijsko odvisnost sipalne matrike z uporabo posplošenih Luscherjevih analitičnih zvez.

ANG

A number of unconventional charmonium-like hadrons have been experimentally discovered during the past decade. Many of them, particularly the charged ones, can not be the conventional charmonia $\bar{c}c$. The most interesting states were found near the thresholds, or they are hadronic resonances above thresholds. The examples of exotic states are tetraquarks, pentaquarks and mesonic molecules.

Prior to this project, none of those hadrons have been rigorously treated within Quantum ChromoDynamics on the lattice. This is the only non-perturbative method, which is based directly on the theory of strong interactions. Only the masses of hadrons well below the threshold have been reliably calculated.

Using lattice QCD, we have simulated the interesting charmonia, charmonium-like states and some other hadrons containing c or b quarks. We focused on the states that lie near the threshold and we have taken into account the effect of threshold for the first time. For resonances we have taken into account their strong decay for the first time. This was achieved by simulating the scattering of two hadrons in the relevant channels, and extracting the scattering matrix.

We presented the first evidence for the existence of the interesting charmonium-like state $X(3872)$ within lattice QCD. We found the state using the simulation of the DD^* scattering in the channel $JPC=1^{++}$ with isospin 0. The pole in the scattering matrix appeared just below DD^* threshold, which was related to the shallow bound state $X(3872)$. The $c\bar{c}$ and DD^* Fock components were found to be crucial in $X(3872)$, while diquark-antidiquark are less important.

The poles were found in the scattering matrix of DK and D^*K scattering. They were related to Ds_0 and Ds_1 mesons. We found that the effect of the thresholds lowered the masses of mesons, thereby bringing them in close agreement with the experiment.

We have predicted the mass of the Bs_0 and Bs_1 mesons, which has not been experimentally discovered yet.

We have presented the first lattice simulation of a charmonium resonance, taking into account its strong decay. The mass and decay width of the vector resonance $\psi(3770)$ was found in a good agreement with the experiment. The channel which should host yet unidentified scalar resonances was also examined.

We determined the discrete energy spectrum in the channel $JPC=1^{+-}$ where the exotic experimental peaks Z_c^+ were discovered. The energy eigenstate related to $Z_c^+(3900)$ with exotic structure $c\bar{c}ud$ was not found. Our results seem in agreement with the result of HALQCD which indicate that $Z_c^+(3900)$ is not conventional resonance, but is related to the coupling of two channels.

The physical states were created with a large number of operators with structure quark-antiquark, meson-meson or diquark-antidiquark. The correlation matrices were calculated with the distillation method. The energy-dependence of the scattering matrix was determined with the generalization of the Luscher's relations.

3. Poročilo o realizaciji predloženega programa dela na raziskovalnem projektu²

Običajni hadroni so mezoni, sestavljeni iz valenčnega kvarka in anti-kvarka, ter barioni sestavljeni iz treh valenčnih kvarkov. Stanja čarmonija ($c\bar{c}$) in čarmoniju-podobna stanja so zanimiva, ker je bilo nedavno v eksperimentu odkrito več nenavadnih stanj te vrste. Eksotična opažena tetrakvarkovska stanja Z_c^+ naj bi bila sestavljena iz $c\bar{c}ud$, opaženi pentakvarkovski stanji pa iz kvarkov $c\bar{c}uud$.

Vsa zanimiva odkrita stanja se nahajajo blizu praga za močni razpad ali pa so hadronske resonance nad pragom. Pred začetkom tega projekta nobeno od teh stanj še ni bilo teoretično pravilno obravnavano s kromodinamiko na mreži. To je edina neperturbativna metoda, ki temelji neposredno na osnovni teoriji močne interakcije med kvarki in gluoni - kromodinamiki. Predhodne simulacije stanj blizu praga so zanemarile vpliv praga, simulacije resonanc nad pragom pa niso upoštevale močnega razpada.

V okviru projekta smo s kromodinamiko na mreži prvič presegli oba groba približka, omenjena v prejšnjem odstavku. Simulirali smo zanimiva stanja čarmonija in čarmoniju-podobna stanja, ter nekatere druge hadrone z težkim kvarkom c ali b . Osredotočili smo se na stanja blizu praga in prvič upoštevali vpliv praga. Pri resonancah nad pragom smo prvič upoštevali njihov močni razpad in določili razpadno širino. To smo dosegli z simulacijo sipanja dveh hadronov v relevantnih kanalih in določitvijo energijske odvisnosti sipalne matrike.

Predstavili smo dokaz za čarmoniju-podobno stanje $X(3872)$ v bližini DD^* praga. Pri tem smo uporabili dinamično simulacijo kanala $JPC=1^{++}$ in $I=0$ v okviru kromodinamike na mreži. To je prva simulacija na mreži, ki predstavi dokaz za $X(3872)$ hkrati z vsemi sosednjimi sipalnimi stanji DD^* in $J/\psi - \omega$, ki so neobhodno prisotna v dinamični simulaciji. Fazni premik za DD^* sipanje je bil določen z Luscherjevim formalizmom, in iz njega smo izluščili veliko negativno sipalno dolžino $a_0 = -1.7 \pm 0.4$ fm. Ekstrapolacija

dobljenega faznega premika nakazuje na pol v sipalni matriki 11 ± 7 MeV pod DD^* pragom. Obstoj tega pola povezujemo z eksperimentalnim stanjem $X(3872)$, ki prav tako leži zelo blizu praga. Podroben študij strukture dobljenega stanja kaže na veliko komponento DD^* , kar je v skladu z fenomenološkimi študijami, ki trdijo da je to stanje mezonška molekula. V kanalu $I=1$ smo našli le sipalna stanja DD^* in J/ψ - ρ , in nobenega kandidata za $X(3872)$. To je v skladu z interpretacijo, da je pri $X(3872)$ dominantna komponenta $I=0$, komponenta $I=1$ pa izhaja le iz zlomitve izospina, ki pa ni prisotna v naši simulaciji z $\mu=md$.

V kasnejši raziskavi stanja $X(3872)$ smo uporabili veliko število interpolacijskih polj oblike $\bar{c}c$, mezon-mezon in dikvark-antikvark. Iz slopitev stanja $X(3872)$ na interpolacijska polja smo ugotovili, da so za $X(3872)$ ključne Fockove komponente $\bar{c}c$ in DD^* , komponente dikvark-antikvark pa so manj pomembne.

Predstavili smo prvo študijo čarmonijevih resonanc, ki upošteva njihove močne razpade. Izluščili smo maso in razpadno širino za najlažjo vektorsko čarmonijevo resonanco $\psi(3770)$ z simulacijo sipanja DD v p -valu. Dobljeni vrednosti se zadovoljivo ujemata z izmerjenimi. Določili smo tudi sipalno matriko za sipanje DD v s -valu, ki je relevantna za skalarne resonance. Poznana je namreč le najlažja čarmonijeva resonanca $\chi_{c1}(1P)$, še vedno pa ni znano njeno prvo vzbujeno stanje. Naši rezultati v skalarnem kanalu mečejo luč na ta odprt problem in nakazujejo na morebitno skalarno stanje z maso med 3.9 in 4.0 GeV. Za rešitev problema skalarnih čarmonijevih resonanc bodo potrebne nadaljne simulacije na mreži in eksperimentalne raziskave.

Predhodne simulacije so vodile do občutno previsokih mas skalarnega mezona $Ds_0(2317)$ in aksialnega mezona $Ds_1(2460)$. Naša hipoteza je bila, da je bilo to posledica tega ker predhodne simulacije niso upoštevale vpliva bližnjih pragov DK in D^*K . Hipoteza se je izkazala za pravilno. Vpliv pragov smo upoštevali z simulacijo sipanja DK in D^*K , ter v obeh primerih našli pol v sipalni matriki nedaleč pod pragom. Pola smo povezali z obstojem vezanih stanj, masi dobljenih mezonov pa so se naposled ujemale z izmerjenimi. V analitični študiji smo kasneje napravili obširnejšo analizo spektrov v obeh omenjenih kanalih. Z Weinbergovim kriterijem kompozitnosti smo ugotovili, da sta obe stanji v doberšni meri sestavljeni iz parov mezonov DK in D^*K .

Napovedali smo masi skalarnega mezona Bs_0 in aksialnega mezona Bs_1 , ki eksperimentalno še nista bila odkrita. Pri tem smo prvič upoštevali vpliv bližnjih pragov BK in B^*K , legi mezonov pa smo našli nedaleč pod pragoma. Eksperiment LHCb na LHC že aktivno išče napovedana mezona.

Določili smo diskretni energijski vrh v kanalu z $JPG=1+-$, kjer so bili eksperimentalno opaženi eksotični vrhovi poimenovani Z_c^+ . Ti vrhovi so izredno zanimivi, saj bi lahko nakazovali na obstoj kratkoživih stanj Z_c^+ z kvarkovsko strukturo $\bar{c}cud$. Uporabili smo zelo veliko število interpolacijskih polj tipa mezon-mezon in dikvark-antikvark, ter prečesali spekter do 4.2 GeV. Našli smo vseh 13 pričakovanih lastnih stanj dveh mezonov na naši končni mreži, na primer $J\psi$ - π , DD^* , itd. Dodatnega lastnega stanja, ki bi bilo lahko kandidat za $Z_c^+(3900)$ nismo odkrili. Rezultati kažejo na to, da eksperimentalni vrh $Z_c^+(3900)$ najverjetneje ni posledica konvencionalnega resonančnega pola v sipalni matriki. Naši rezultati se zdijo v skladu z rezultati simulacije skupine HALQCD, ki nakazujejo, da vrh $Z_c^+(3900)$ ni navadna resonanca, temveč posledica močne sklopitve med kanaloma J/ψ - π in $D-D^*$. Za potrditev te hipoteze bodo potrebne nadaljne simulacije tega zahtevnega kanala.

V simulacijah smo kreirali oziroma anihilirali fizikalna z velikim številom operatorjev oblike kvark-antikvark, mezon-mezon in dikvark-antikvark. Korelacijske matrike smo izračunali z polno ali stohastično distilacijo. To nam je omogočilo izračun vseh potrebnih Wickovih kontrakcij. Nekatere izmed njih se namreč v praksi ne da izračunati s konvencionalno metodo. Iz korelacijskih matrik smo določili diskreten energijski spekter z uporabo variacijske metode, ob tem pa smo pridobili tudi vrednosti sklopitev lastnih stanj na vsa interpolacijska polja. Iz energijskega spektra na končni mreži smo določili energijsko odvisnost sipalne matrike z uporabo posplošenih Luscherjevih analitičnih zvez.

4.Ocena stopnje realizacije programa dela na raziskovalnem projektu in zastavljenih raziskovalnih ciljev³

Načrtovan projekt je bil v celoti realiziran.

5.Utemeljitev morebitnih sprememb programa raziskovalnega projekta oziroma sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine⁴

Načrtovan projekt je bil v celoti realiziran.

6.Najpomembnejši znanstveni rezultati projektne skupine⁵

	Znanstveni dosežek		
1.	COBISS ID	2613348	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Dokaz za stanje X(3872) iz sipanja DD* na mreži
		ANG	Evidence for X(3872) from DD* scattering on the lattice
	Opis	SLO	Predstavili smo prvi dokaz za obstoj zanimivega čarmoniju-podobnega stanja X(3872) s kromodinamiko na mreži. Stanje smo našli v dinamični simulaciji sipanja D D* v kanalu z J PC=1++ in izospinom 0. Malce pod pragom DD* smo namreč našli pol v sipalni matriki in njegov obstoj povezali z X(3872).
		ANG	We presented the first evidence for the existence of the interesting charmonium-like state X(3872) within lattice QCD. We found the state using the dynamical simulation of the DD* scattering the the channel JPC=1++ with isospin 0. The pole in the scattering matrix was found just below DD* threshold which was related the shallow bound state X(3872).
	Objavljeno v	American Physical Society; Physical review letters; 2013; Vol. 111, iss. 19; str. 192001-1-192001-5; Impact Factor: 7.728;Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.852; A'': 1;A': 1; WoS: UI; Avtorji / Authors: Prelovšek Saša, Leskovec Luka	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
2.	COBISS ID	2631780	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Ds0(2317) meson in sipanje DK na mreži
		ANG	Ds0(2317) meson and DK scattering from lattice QCD
	Opis	SLO	Predhodne simulacije so vodile do občutno previsoke mase skalarne mezone Ds0(2317). Naša hipoteza je bila, da je bilo to posledica tega ker niso upoštevale vpliva bližnjih praga DK. Hipoteza se je izkazala za pravilno. Vpliv praga smo upoštevali z simulacijo sipanja DK ter našli pol v sipalni matriki nedaleč pod pragom. Pol smo povezali z obstojem vezanega stanja Ds(2317), masa dobljenega mezone pa se je naposled ujemala z izmerjeno.
		ANG	Previous lattice QCD simulations rendered too large value for the mass of the meson Ds0(2317). Our hypothesis was that this was due to the omission of the DK threshold effect. The hypothesis turned out correct. We took the effect of the threshold into account by simulating DK scattering and we found a pole in the scattering matrix below the threshold. The pole was related to Ds0 meson and the mass turned out finally in agreement with experiment.
	Objavljeno v	American Physical Society; Physical review letters; 2013; Vol. 111, iss. 22; str. 222001-1-222001-5; Impact Factor: 7.728;Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 2.852; A'': 1;A': 1; WoS: UI; Avtorji /	

		Authors: Mohler Daniel, Lang Christian B., Leskovec Luka, Prelovšek Saša, Woloshyn Richard M.
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
3.	COBISS ID	2847588 Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Vektorske in skalarne čarmonijeve resonance s kromodinamiko na mreži
		<i>ANG</i> Vector and scalar charmonium resonances with lattice QCD
	Opis	<i>SLO</i> Predstavili prvo študijo čarmonijevih resonanc, ki upošteva njihove močne razpade. Določili smo maso in razpadno širino za najlažjo vektorsko resonanco $\psi(3770)$, ki razpada v par čarobnih mezonov. Dobljeni vrednosti se zadovoljivo ujemata z izmerjenimi. Preučili smo tudi kanal relevanten za skalarne čarmonijeve resonance saj ni znano katero eksperimentalno stanje naj bi jim ustrezalo.
		<i>ANG</i> We have presented the first lattice simulation of a charmonium resonance, taking into account its strong decay. The mass and decay width of the vector resonance $\psi(3770)$ was determined by simulating DD scattering in p-wave. The resulting mass and width are in fair agreement with experiment. The channel which should host yet unidentified scalar resonances was examined by simulating DD scattering in s-wave.
	Objavljeno v	Società italiana di fisica; The Journal of high energy physics; 2015; Vol. 2015, art. no. 89; 23 str.; Impact Factor: 6.111; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 3.368; A': 1; Avtorji / Authors: Lang Christian B., Leskovec Luka, Mohler Daniel, Prelovšek Saša
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek
4.	COBISS ID	2775652 Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i> Študija kanala Z_c^+ s kromodinamiko na mreži
		<i>ANG</i> Study of the Z_c^+ channel using lattice QCD
	Opis	<i>SLO</i> Določili smo diskretni energijski v kanalu z $JPG=1^{+-}$, kjer so bili eksperimentalni opaženi eksotični vrhovi poimenovani Z_c^+ . Ti vrhovi so izredno zanimivi, saj bi lahko nakazovali na obstoj kratkoživih čarmonijupodobnih stanj Z_c^+ z kvarkovsko strukturo $ccud$. Uporabili smo zelo veliko število interpolacijskih polj tipa mezon-mezon in diquark-antidiquark, ter prečesali spekter do 4.2 GeV. Našli smo vsa pričakovana dvo-mezonska lastna stanja, na primer $J\psi$ - π , DD^* , itd. Dodatnega lastnega stanja, ki bi bilo lahko kandidat za $Z_c^+(3900)$ nismo odkrili. Rezultati kažejo na to, da eksperimentalni vrh $Z_c^+(3900)$ najverjetneje ni posledica konvencionalnega resonančnega pola v sipalni matriki. Naši rezultati se zdijo v skladu z rezultati simulacije skupine HALQCD, ki nakazujejo da vrh $Z_c^+(3900)$ ni navadna resonanca, temveč posledica močne sklopitve med kanaloma J/ψ - π in D - D^* .
		<i>ANG</i> We determined the discrete energy spectrum in the channel $JPG=1^{+-}$ where the exotic experimental peaks called Z_c^+ were discovered. These peaks are interesting since they could indicate the existence of shortlived state charmonium-like Z_c^+ with quark structure $ccud$. A large number of interpolating fields with structure meson-meson and diquark-antidiquark were used. We searched the energy region up to 4.2 GeV. All expected two-meson eigenstates were found, while the energy eigenstate related to $Z_c^+(3900)$ was not found. Our result seems in agreement with the result of HALQCD collaboration which indicate that a peak $Z_c^+(3900)$ is not related to resonance pole but to the coupling of channels DD^* and J/ψ π .
	Objavljeno v	American Physical Society; Physical review. D, Particles, fields, gravitation, and cosmology; 2015; Vol. 91, iss. 1; str. 014504-1-014504-10; Impact Factor: 4.643; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 3.368; A': 1; WoS: BU, UP; Avtorji / Authors: Prelovšek Saša, Lang

		Christian B., Leskovec Luka, Mohler Daniel	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	
5.	COBISS ID	2834788	Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i>	X(3872) in Y(4140) z operatorji dikvark-antidikvark na mreži
		<i>ANG</i>	X(3872) and Y(4140) using diquark-antidiquark operators with lattice QCD
	Opis	<i>SLO</i>	To je bila podrobnejša raziskava stanja X(3872), kjer smo implementirali veliko število interpolacijskih polj oblike cc, mezon-mezon in dikvark-antidikvark. Iz slopitev stanja X(3872) na interpolacijska polja smo ugotovili, da so za X(3872) ključne Fockove komponente cc in DD*, komponente dikvark-antidikvark pa so manj pomembne.
		<i>ANG</i>	This was a more detailed study of X(3872), which was evidenced in our earlier simulation. For this purpose we implemented a much larger number of interpolating fields with structure cc, meson/meson and diquark-antidiquark. From the coupling of the X(3872) eigenstate to the various interpolating fields we concluded that cc and DD* Fock components are more crucial for this state than the diquark-antidiquark ones.
	Objavljeno v	American Physical Society; Physical review. D, Particles, fields, gravitation, and cosmology; 2015; Vol. 92, iss. 3; str. 034501-1-034501-14; Impact Factor: 4.643; Srednja vrednost revije / Medium Category Impact Factor: 3.368; A': 1; WoS: BU, UP; Avtorji / Authors: Padmanath M., Lang Christian B., Prelovšek Saša	
	Tipologija	1.01 Izvirni znanstveni članek	

7. Najpomembnejši družbeno-ekonomski rezultati projektne skupine⁶

	Družbeno-ekonomski dosežek		
1.	COBISS ID	2806628	Vir: COBISS.SI
	Naslov	<i>SLO</i>	Hadronska spektroskopija
		<i>ANG</i>	Hadron spectroscopy
	Opis	<i>SLO</i>	To je zbornik za vabljen pregledno plenarno predavanje na konferenci "Lattice 2014". Predstavila sme pregled nedavnih rezultatov na področju hadronske spektroskopije, dobljenih v okviru kromodinamike na mreži. Predstavljene so študije nenavadnih stanj X(3872) in Ds0(2317) blizu pragov ter iskanja eksotičnih stanj Zc+ in X(4140). Pri mezonskih resonancah je povdarek na študijah, ki izluščijo resonančne mase in tudi njihove razpadne širine. Predstavljena je tudi prva simulacija dveh sklopljenih sipalnih kanalov.
		<i>ANG</i>	This is the proceedings for the invited review plenary lecture on the conference "Lattice 2014". I reviewed the recent results on the hadron spectroscopy from lattice QCD. The emphasis is on the meson sector and in particular on quarkonium-like XYZ states. The manuscript reports on the first rigorous treatment of the near-threshold states X(3872) and Ds0 (2317), and the lattice searches for Zc+(3900), X(4140) and double-charm tetraquark states. Meson resonances in light, strange and charm sector are reviewed, where the resonances masses as well as the strong decay widths are reported. The first lattice QCD simulation of two coupled-channels is discussed.
	Šifra	B.04 Vabljen predavanje	
	Objavljeno v	Sissa; The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory, LATTICE 2014, 23-28 June, 2014, Columbia University, New York; Pos proceedings of science; 2014; 20 str.; Avtorji / Authors: Prelovšek Saša	

	Tipologija	1.06 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci (vabljeni predavanja)	
2.	COBISS ID	2652260	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Pregled spektroskopije hadronov s čarobnim kvarkom iz mreže
		ANG	Lattice QCD review of charmonium and open-charm spectroscopy
	Opis	SLO	To je zbornik za vabljeni pregledni plenarni predavanje na konferenci "CHARM 2013".
		ANG	This is proceedings for the invited review plenary lecture at the conference "CHARM 2013".
	Šifra	B.04 Vabljeni predavanja	
	Objavljeno v	SLAC National Accelerator Laboratory; Proceedings of the 6th International Workshop on Charm Physics, CHARM 2013, Manchester, UK, 31 August - 4 September, 2013; 2013; 11 str.; Avtorji / Authors: Prelovšek Saša	
	Tipologija	1.06 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci (vabljeni predavanja)	
3.	COBISS ID	2816100	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Hadronske resonance v kromodinamiki na mreži
		ANG	Hadronic resonances from lattice QCD
	Opis	SLO	Doktorsko delo dr. Luke Leskovca, ki je deloval na problematiki projekta in je bil so-avtor številnih člankov. Nosilka projekta, prof. Saša Prelovšek Komelj je bila njegova mentorica, dr. Daniel Mohler somentor.
		ANG	PhD thesis of dr. Luka Leskovec, who worked on the topic of the project and co-authored on numerous papers on the topic. Prof. Sasa Prelovsek was his PhD advisor, dr. Daniel Mohler was co-advisor.
	Šifra	D.09 Mentorstvo doktorandom	
	Objavljeno v	[L. Leskovec]; 2015; 189 str.; Avtorji / Authors: Leskovec Luka	
	Tipologija	2.08 Doktorska disertacija	
4.	COBISS ID	2834532	Vir: COBISS.SI
	Naslov	SLO	Nova hadronska stanja v kromodinamiki na mreži
		ANG	Lattice results for new hadronic states
	Opis	SLO	To je povzetek preglednega vabljenega predavanja na konferenci APS v Baltimoru 2015.
		ANG	This is the abstract of the invited review lecture at the APS meeting at Baltimore in 2015.
	Šifra	B.04 Vabljeni predavanja	
	Objavljeno v	American Physical Society; APS April Meeting 2015, Saturday-Tuesday, April 11-14, 2015, Baltimore, Maryland; 2015; Avtorji / Authors: Prelovšek Saša	
	Tipologija	1.10 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci (vabljeni predavanja)	

8. Drugi pomembni rezultati projektne skupine²

B.05 Gostujoči profesor na inštitutu/univerzi
 Prof. Saša Prelovšek Komelj je bila gostujoči profesor na inštitutu Jefferson Lab, Virginia, ZDA, februar 2015-avgust 2015
 Prof. Saša Prelovšek Komelj was visiting professor at Theory Center, Jefferson Lab, Virginia,

USA, February 2015-august 2015

D.01 Vodenje/koordiniranje (mednarodnih) projektov

Prof. Saša Prelovšek Komelj je bila v času projekta teoretični koordinator za eksperiment Belle 2, KEK, Tsukuba, Japonska (delovna skupina "Quarkonium(like) hadrons")

During the project, prof. Saša Prelovšek Komelj was the theoretical coordinator for the Belle 2 experiment, KEK, Tsukuba, Japan (working group "Quarkonium(like) hadrons")

<https://belle2.cc.kek.jp/~twiki/bin/view/B2TiP>

9. Pomen raziskovalnih rezultatov projektne skupine⁸

9.1. Pomen za razvoj znanosti²

SLO

Za znanost na splošno je gotovo pomembno ugotoviti ali obstajajo hadroni, ki niso mezoni qq oziroma barioni qqq . V zadnjem desetletju je bilo odkritih več hadronskih stanj, ki morda nimajo take strukture. V okviru projekta smo predstavili prve ab-initio simulacije relevantnih kanalov v kromodinamiki na mreži, zato so bili rezultati deležni velike pozornosti iz teoretične in eksperimentalne strani.

Študij kromodinamike z simulacijami na mreži je v zadnjih letih silovito napredoval zaradi bliskovitega razmaha superračunalniške moči, pa tudi razvoja ključnih analitičnih metod in novih algoritmov. Pred začetkom projekta so bili pri simulacijah relevantnih hadronskih resonanc zanemarjeni njihovi močni razpadi, pa tudi učinek bližnjih pragov. V okviru projekta smo predstavili pionirske simulacije, ki prvič upoštevajo ta dva pomembna učinka.

ANG

It is definitely important for the science in general to establish whether there exist some hadrons that are not conventional mesons qq or baryons qqq . During the past decade, the experiments have discovered candidates for hadrons that may not have such a structure. We have presented the first ab-initio simulations of the relevant exotic channels using the Quantum ChromoDynamics on the lattice. The results of the project have received the wide recognition of the theoretical and experimental community.

First principle lattice simulations of ChromoDynamics have immensely advanced in the recent years due to the rapid rise of the super-computer power, but also due to the new theoretical ideas and algorithms. The simulations prior to the beginning of the project have relayed on two serious approximations concerning the relevant hadrons: hadronic resonances were simulated as if they did not decay strongly, and effects of thresholds were neglected. Within the project, we have performed the pioneering simulations that took these two important effects into account for the first time.

9.2. Pomen za razvoj Slovenije¹⁰

SLO

Rezultati pionirskih raziskav v okviru projekta so nedvomno prispevali k ugledu slovenskih znanstvenikov in Slovenije kot celote. Številna vabljenja predavanja v preteklih letih iz povezane tematike kažejo na to, da Slovenski znanstveniki na projektu sodijo v sam vrh pri raziskavah Hadronske Spektroskopije, Hadronskih interakcij in Eksotičnih Hadronov.

Povezava z Avstrijskimi znanstveniki v okviru tega FWF-ARRS projekta je bila izredno plodovita in spodbuja nadaljnje sodelovanje. Raziskovalna povezava med Avstrijskim nosilcem prof. Christianom B. Langom iz Univerze v Grazu in slovensko nosilko prof. Sašo Prelovšek Komelj je bila ključna za uspeh projekta. Uspešno sodelovanje v okviru projekta spodbuja nadaljnje sodelovanje med avstrijskimi in slovenskimi znanstveniki.

ANG

The pioneering results obtained within the project have undoubtedly promoted reputation of Slovenian scientists and the country as a whole. The number of invited talks on the related results over the past few years indicate that Slovenian scientists on the project have played a leading role on topics like Hadron spectroscopy, Hadron interactions and Exotic Hadrons.

The collaboration with the Austrian scientists within this FWF-ARRS project was extremely valuable and fruitful. The closely connected research of the Austrian PI, prof. Christian B. Lang, and Slovenian PI, prof. Saša Prelovšek Komelj, was the key to the success of the project. The successful collaboration, that was established, calls for further collaboration between Austrian and Slovenian scientists.

10. Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!

Označite, katerega od navedenih ciljev ste si zastavili pri projektu, katere konkretne rezultate ste dosegli in v kakšni meri so doseženi rezultati uporabljeni

Cilj		
F.01	Pridobitev novih praktičnih znanj, informacij in veščin	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.02	Pridobitev novih znanstvenih spoznanj	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.03	Večja usposobljenost raziskovalno-razvojnega osebja	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.04	Dvig tehnološke ravni	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.05	Sposobnost za začetek novega tehnološkega razvoja	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.06	Razvoj novega izdelka	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.07	Izboljšanje obstoječega izdelka	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.08	Razvoj in izdelava prototipa	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE

	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.09	Razvoj novega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.10	Izboljšanje obstoječega tehnološkega procesa oz. tehnologije	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.11	Razvoj nove storitve	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.12	Izboljšanje obstoječe storitve	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.13	Razvoj novih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.14	Izboljšanje obstoječih proizvodnih metod in instrumentov oz. proizvodnih procesov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.15	Razvoj novega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.16	Izboljšanje obstoječega informacijskega sistema/podatkovnih baz	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.17	Prenos obstoječih tehnologij, znanj, metod in postopkov v prakso	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	

	Uporaba rezultatov	
F.18	Posredovanje novih znanj neposrednim uporabnikom (seminarji, forumi, konference)	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.19	Znanje, ki vodi k ustanovitvi novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.20	Ustanovitev novega podjetja ("spin off")	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.21	Razvoj novih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.22	Izboljšanje obstoječih zdravstvenih/diagnostičnih metod/postopkov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.23	Razvoj novih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.24	Izboljšanje obstoječih sistemskih, normativnih, programskih in metodoloških rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.25	Razvoj novih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.26	Izboljšanje obstoječih organizacijskih in upravljavskih rešitev	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	

F.27	Prispevek k ohranjanju/varovanje naravne in kulturne dediščine	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.28	Priprava/organizacija razstave	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.29	Prispevek k razvoju nacionalne kulturne identitete	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.30	Strokovna ocena stanja	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.31	Razvoj standardov	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.32	Mednarodni patent	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.33	Patent v Sloveniji	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.34	Svetovalna dejavnost	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	
F.35	Drugo	
	Zastavljen cilj	☐ DA ☐ NE
	Rezultat	
	Uporaba rezultatov	

Komentar

--

11. Samo za aplikativne projekte in podoktorske projekte iz gospodarstva!
Označite potencialne vplive oziroma učinke vaših rezultatov na navedena področja

	Vpliv	Ni vpliva	Majhen vpliv	Srednji vpliv	Velik vpliv	
G.01	Razvoj visokošolskega izobraževanja					
G.01.01.	Razvoj dodiplomskega izobraževanja	☐	☐	☐	☐	
G.01.02.	Razvoj podiplomskega izobraževanja	☐	☐	☐	☐	
G.01.03.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.02	Gospodarski razvoj					
G.02.01	Razširitev ponudbe novih izdelkov/storitev na trgu	☐	☐	☐	☐	
G.02.02.	Širitev obstoječih trgov	☐	☐	☐	☐	
G.02.03.	Znižanje stroškov proizvodnje	☐	☐	☐	☐	
G.02.04.	Zmanjšanje porabe materialov in energije	☐	☐	☐	☐	
G.02.05.	Razširitev področja dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.02.06.	Večja konkurenčna sposobnost	☐	☐	☐	☐	
G.02.07.	Večji delež izvoza	☐	☐	☐	☐	
G.02.08.	Povečanje dobička	☐	☐	☐	☐	
G.02.09.	Nova delovna mesta	☐	☐	☐	☐	
G.02.10.	Dvig izobrazbene strukture zaposlenih	☐	☐	☐	☐	
G.02.11.	Nov investicijski zagon	☐	☐	☐	☐	
G.02.12.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.03	Tehnološki razvoj					
G.03.01.	Tehnološka razširitev/posodobitev dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.03.02.	Tehnološko prestrukturiranje dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.03.03.	Uvajanje novih tehnologij	☐	☐	☐	☐	
G.03.04.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.04	Družbeni razvoj					
G.04.01	Dvig kvalitete življenja	☐	☐	☐	☐	
G.04.02.	Izboljšanje vodenja in upravljanja	☐	☐	☐	☐	
G.04.03.	Izboljšanje delovanja administracije in javne uprave	☐	☐	☐	☐	
G.04.04.	Razvoj socialnih dejavnosti	☐	☐	☐	☐	
G.04.05.	Razvoj civilne družbe	☐	☐	☐	☐	
G.04.06.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.05.	Ohranjanje in razvoj nacionalne naravne in kulturne dediščine in identitete					
G.06.	Varovanje okolja in trajnostni razvoj					

G.07	Razvoj družbene infrastrukture					
G.07.01.	Informacijsko-komunikacijska infrastruktura	☐	☐	☐	☐	
G.07.02.	Prometna infrastruktura	☐	☐	☐	☐	
G.07.03.	Energetska infrastruktura	☐	☐	☐	☐	
G.07.04.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	
G.08.	Varovanje zdravja in razvoj zdravstvenega varstva	☐	☐	☐	☐	
G.09.	Drugo:	☐	☐	☐	☐	

Komentar

--

12. Pomen raziskovanja za sofinancerje¹¹

	Sofinancer		
1.	Naziv		
	Naslov		
	Vrednost sofinanciranja za celotno obdobje trajanja projekta je znašala:		EUR
	Odstotek od utemeljenih stroškov projekta:		%
	Najpomembnejši rezultati raziskovanja za sofinancerja	Šifra	
	1.		
	2.		
	3.		
	4.		
	5.		
Komentar			
Ocena			

13. Izjemni dosežek v letu 2015¹²**13.1. Izjemni znanstveni dosežek**

--

13.2. Izjemni družbeno-ekonomski dosežek

--

C. IZJAVE

Podpisani izjavljam/o, da:

- so vsi podatki, ki jih navajamo v poročilu, resnični in točni
- se strinjamo z obdelavo podatkov v skladu z zakonodajo o varstvu osebnih podatkov za potrebe ocenjevanja ter obdelavo teh podatkov za evidence ARRS

- so vsi podatki v obrazcu v elektronski obliki identični podatkom v obrazcu v pisni obliki
- so z vsebino zaključnega poročila seznanjeni in se strinjajo vsi soizvajalci projekta

Podpisi:

*zastopnik oz. pooblaščen oseba
raziskovalne organizacije:*

in

vodja raziskovalnega projekta:

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za
matematiko in fiziko

Saša Prelovšek Komelj

ŽIG

Datum:

16.3.2016

Oznaka poročila: ARRS-RPROJ-ZP-2016/25

¹ Napišite povzetek raziskovalnega projekta (največ 3.000 znakov v slovenskem in angleškem jeziku) [Nazaj](#)

² Napišite kratko vsebinsko poročilo, kjer boste predstavili raziskovalno hipotezo in opis raziskovanja. Navedite ključne ugotovitve, znanstvena spoznanja, rezultate in učinke raziskovalnega projekta in njihovo uporabo ter sodelovanje s tujimi partnerji. Največ 12.000 znakov vključno s presledki (približno dve strani, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

³ Realizacija raziskovalne hipoteze. Največ 3.000 znakov vključno s presledki (približno pol strani, velikost pisave 11) [Nazaj](#)

⁴ V primeru bistvenih odstopanj in sprememb od predvidenega programa raziskovalnega projekta, kot je bil zapisan v predlogu raziskovalnega projekta oziroma v primeru sprememb, povečanja ali zmanjšanja sestave projektne skupine v zadnjem letu izvajanja projekta, napišite obrazložitev. V primeru, da sprememb ni bilo, to navedite. Največ 6.000 znakov vključno s presledki (približno ena stran, velikost pisave 11). [Nazaj](#)

⁵ Navedite znanstvene dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Raziskovalni dosežek iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A" ali A'. [Nazaj](#)

⁶ Navedite družbeno-ekonomske dosežke, ki so nastali v okviru tega projekta. Družbeno-ekonomski rezultat iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) vpišete tako, da izpolnite COBISS kodo dosežka – sistem nato sam izpolni naslov objave, naziv, IF in srednjo vrednost revije, naziv FOS področja ter podatek, ali je dosežek uvrščen v A" ali A'.

Družbeno-ekonomski dosežek je po svoji strukturi drugačen kot znanstveni dosežek. Povzetek znanstvenega dosežka je praviloma povzetek bibliografske enote (članka, knjige), v kateri je dosežek objavljen.

Povzetek družbeno-ekonomskega dosežka praviloma ni povzetek bibliografske enote, ki ta dosežek dokumentira, ker je dosežek sklop več rezultatov raziskovanja, ki je lahko dokumentiran v različnih bibliografskih enotah. COBISS ID zato ni enoznačen, izjemoma pa ga lahko tudi ni (npr. prehod mlajših sodelavcev v gospodarstvo na pomembnih raziskovalnih nalogah, ali ustanovitev podjetja kot rezultat projekta ... - v obeh primerih ni COBISS ID). [Nazaj](#)

⁷ Navedite rezultate raziskovalnega projekta iz obdobja izvajanja projekta (do oddaje zaključnega poročila) v primeru, da katerega od rezultatov ni mogoče navesti v točkah 6 in 7 (npr. ni voden v sistemu COBISS). Največ 2.000 znakov, vključno s presledki. [Nazaj](#)

⁸ Pomen raziskovalnih rezultatov za razvoj znanosti in za razvoj Slovenije bo objavljen na spletni strani: <http://sicris.izum.si/> za posamezen projekt, ki je predmet poročanja [Nazaj](#)

⁹ Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

¹⁰ Največ 4.000 znakov, vključno s presledki [Nazaj](#)

¹¹ Rubrike izpolnite / prepišite skladno z obrazcem "izjava sofinancerja" <http://www.rrs.gov.si/sl/progproj/rproj/gradivo/>, ki ga mora izpolniti sofinancer. Podpisan obrazec "Izjava sofinancerja" pridobi in hrani nosilna raziskovalna organizacija – izvajalka projekta. [Nazaj](#)

¹² Navedite en izjemni znanstveni dosežek in/ali en izjemni družbeno-ekonomski dosežek raziskovalnega projekta v letu 2015 (največ 1000 znakov, vključno s presledki). Za dosežek pripravite diapozitiv, ki vsebuje sliko ali drugo slikovno gradivo v zvezi z izjemnim dosežkom (velikost pisave najmanj 16, približno pol strani) in opis izjemnega dosežka (velikost pisave 12, približno pol strani). Diapozitiv/-a priložite kot priponko/-i k temu poročilu. Vzorec diapozitiva je objavljen na spletni strani ARRS <http://www.rrs.gov.si/sl/gradivo/>, predstavitev dosežkov za pretekla leta pa so objavljena na spletni

strani <http://www.arrs.gov.si/sl/analize/dosez/>. [Nazaj](#)

Obrazec: ARRS-RPROJ-ZP/2016 v1.00

ED-E0-F7-68-BB-B9-57-0C-C4-C9-EE-1C-0A-8C-A3-8F-8F-32-95-37