



Warszawa, 5.09.2023

dr hab. Jakub Wagner, prof NCBJ  
Zakład Fizyki Teoretycznej  
Departament Badań Podstawowych  
Narodowe Centrum Badań Jądrowych  
ul. Pasteura 7, 02-093 Warszawa  
[jakub.wagner@ncbj.gov.pl](mailto:jakub.wagner@ncbj.gov.pl)

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Shahriyar Jafarzade  
pt. „PHENOMENOLOGY OF LIGHT MESONS WITH  $J=2,3$ ”**

Przedstawiona rozprawa doktorska dotyczy opisu właściwości lekkich mezonów o spinie 2 i 3 przy użyciu modeli efektywnych, tzw. rozszerzonych liniowych modeli sigma (extended Linear Sigma Models - eLSM). Składa się ona z 7 rozdziałów, w tym ze wstępu i podsumowania, rozbudowanej bibliografii oraz spisu ilustracji i tabel. Napisana została po angielsku.

Praca pana Jafarzade oparta jest na następujących publikacjach:

1. „*From well-known tensor mesons to yet unknown axial-tensor mesons*”,  
**Shahriyar Jafarzade** (Jan Kochanowski U.), Arthur Vereijken (Jan Kochanowski U.), Milena Piotrowska (Jan Kochanowski U.), Francesco Giacosa (Jan Kochanowski U. and Frankfurt U.), **Phys.Rev.D** **106** (2022) 3, 036008
2. „*A phenomenological note on the missing  $\rho_2$  meson*”,  
**Shahriyar Jafarzade** (Jan Kochanowski U.), **PoS ICHEP2022** (2022), 903,
3. „*Is  $f_2(1950)$  the tensor glueball?*”,  
Arthur Vereijken (Jan Kochanowski U.), **Shahriyar Jafarzade** (Jan Kochanowski U.), Milena Piotrowska (Jan Kochanowski U.), Francesco Giacosa (Jan Kochanowski U. and Frankfurt U., Inst. Kernphys.), **Phys.Rev.D** **108** (2023) 1, 014023
4. „*Phenomenology of  $J^{PC} = 3^{--}$  tensor mesons*”,  
**Shahriyar Jafarzade** (Jan Kochanowski U.), Adrian Koenigstein (Goethe U., Frankfurt (main)), Francesco Giacosa (Goethe U., Frankfurt (main) and Jan

Kochanowski U.), **Phys.Rev.D** **103** (2021) 9, 096027

5. „*Thermodynamics of the glueball resonance gas*”, Enrico Trotti (Jan Kochanowski U. and Frankfurt U.), **Shahriyar Jafarzade** (Jan Kochanowski U.), Francesco Giacosa (Jan Kochanowski U. and Frankfurt U.), **Eur.Phys.J.C** **83** (2023) 5, 390

Cztery z powyższych artykułów opublikowano w najlepszych światowych czasopismach z dziedziny fizyki wysokich energii (w tym jeden już po złożeniu pracy), jeden jest publikacją pokonferencyjną. Dorobek ten należy ocenić bardzo wysoko i świadczy on o wysokiej aktywności naukowej doktoranta, oraz o tym, że jego badania dotyczą zagadnień istotnych dla międzynarodowej społeczności fizyków cząstek elementarnych.

Przedstawioną rozprawę doktorską oceniam **pozytywnie**, poniżej przedstawiam krótki opis i uzasadnienie tej oceny.

W rozdziale pierwszym, będącym wstępem do przedstawionych dalej wyników, autor wprowadza podstawowe pojęcia i struktury chromodynamiki kwantowej, w szczególności podkreślając role symetrii chiralnej i zapachowej. Następnie przedstawia klasyfikację konwencjonalnych mezonów, złożonych z pary kwark-antykwar, przedstawia listę otwartych problemów dotyczących mezonów o spinach 2 i 3, oraz formułuje pytanie o to czy któryś z obserwowanych stanów o liczbach kwantowych  $2^{++}$  może być postulowanym w ramach QCD (między innymi w ramach obliczeń na sieciach) stanem czysto gluonowym – tzw. glueballem. Następnie autor zamieszcza streszczenie najważniejszych osiągniętych wyników oraz przedstawia strukturę pracy. Rozdział ten stanowi dobre wprowadzenie do poruszanych dalej zagadnień, ułatwiając dalszą lekturę.

Rozdział drugi również pełni rolę wstępu do następnych części, a jego głównym celem jest wprowadzenie Liniowego Modelu Sigma oraz jego rozszerzenie. Model ten oryginalnie służył opisowi oddziaływań pionów z nukleonami, został następnie rozszerzony o oddziaływania mezonów o spinie 1, a w recenzowanej pracy uogólniono go w sposób umożliwiający także opis mezonów o spinach 2 i 3. Wprowadzono także opis rozpadu mezonów na przykładzie rozpadu mezonu wektorowego rho na dwa piony.

W rozdziale trzecim autor przechodzi do przedstawienia osiągniętych przez niego oryginalnych wyników dotyczących mezonów o spinie 2. Pierwszym krokiem jest stworzenie lagranżjanu eLSM zawierającego te mezony oraz ich oddziaływania. Następnie, autor opisuje w jaki sposób wyznaczone zostały parametry tego modelu poprzez dopasowanie ich do eksperymentalnych danych dotyczących mas i rozpadów mezonów tensorowych. Uzyskany w ten sposób model został wykorzystany do stworzenia przewidywań dotyczących niektórych rozpadów mezonów tensorowych,

oraz do wyznaczenia mas oraz rozpadów aksjalnych mezonów tensorowych. Uzyskane w ten sposób wyniki sugerują, że mezony te mają dość duże szerokości rozpadów, co tłumaczyć może fakt, iż ich do tej pory nie zaobserwowano.

Rozdział czwarty poświęcony jest opisowi (w ramach eLSM) tensorowego stanu składającego się z samych gluonów, tak zwanemu tensorowemu glueballowi, oraz odpowiedzi na pytanie o to, który z obserwowanych eksperymentalnie stanów o odpowiednich liczbach kwantowych, mógłby być takim glueballem. Ze względu na nieznane wartości parametrów tego sektora eLSM, autor przedstawia stosunki szerokości rozpadów i konfrontuje je z danymi eksperymentalnymi, konkludując że najlepszym kandydatem na tensorowy glueball jest stan  $f_2(1950)$ .

W rozdziale piątym autor zajmuje się opisem mezonów o liczbach kwantowych  $3^-$ , przy użyciu teorii efektywnej opartej o symetrię zapachową. Podejście to pozwala na wyznaczenie szeregu rozpadów i skonfrontowanie ich z danymi eksperymentalnymi, bądź tam gdzie ich brak, na przedstawienie przewidywań dla przyszłych eksperymentów. Dodatkowo autor zamieszcza stosunki szerokości rozpadów postulowanego glueballa  $3^-$ . Uzyskane wyniki mogą mieć duże znaczenie dla interpretacji danych zebranych w eksperymentach takich jak GlueX, CLAS12 w JLab, COMPASS i LHCb w CERN oraz BESIII oraz planowanego eksperymentu PANDA w GSI.

Rozdział szósty poświęcony jest wyznaczeniu właściwości termodynamicznych w czystym sektorze Yanga-Millsa w QCD, w ramach modelu gazu glueballi, uwzględniając spektrum glueballi uzyskane w najnowszych obliczeniach na sieciach. Uzyskane w ramach tego modelu wyniki pokazują zgodność takich wielkości jak ciśnienie, entropia, czy trace anomalie z niezależnymi obliczeniami na sieciach. Dodatkowo, autor bada wpływ cięższych glueballi oraz oddziaływań między skalarnymi i tensorowymi glueballami na te wielkości termodynamiczne i pokazuje że jest on zaniedbywalny.

Praca napisana jest dość starannie, poniżej zamieszczam kilka uwag oraz pytań do autora. Uwagi te nie zmieniają mojej **jednoznacznie pozytywnej** opinii o przedstawionej rozprawie. Oto one:

W wymienionych w części 1.4 publikacjach autora występują zaskakujące rozbieżności między przytoczonymi tytułami, a tytułami znajdującymi się w opublikowanych czasopismach.

Na ilustracji 1.3, znajdują się nieopisane w tekście ani w podpisie strzałki, (prawdopodobnie opisujące mieszanie pomiędzy stanami?).

We wzorze 2.54 prawdopodobnie wystąpiła literówka (bądź kolizja oznaczeń) i powinno być  $\vec{p}$  zamiast  $\vec{k}$  (w tej wersji prawa strona równania byłaby równa zero,

porównaj wzór 2.47). We fragmencie tym dobrze byłoby także dodać definicję wielkości  $k_1$  i  $k_2$ .

We wzorach 2.77, 2.81, 2.83 i 2.88 występują wielokropki, autor nie wyjaśnia jednak jakie części wzoru pomija.

W tabeli 3.4 pierwsze dwa parametry podane są bez żadnej niepewności. Dlaczego?

W rozdziale trzecim, parametry lagranżjanu eLSM fitowane są do danych doświadczalnych, z wnioskiem (np. na stronie 44) o ogólnie dobrej jakościowej zgodności między przewidywaniami a danymi doświadczalnymi. Czy dałoby się sformułować bardziej ilościowe wnioski dotyczące jakości dopasowania (w postaci np. zredukowanej wartości  $\chi^2$ )?


W tabeli 5.6 autor porównuje przewidywania modelu z wynikami otrzymanymi na sieci. Nie podaje jednak niepewności obu podejść, przez co wyciągnięcie jakichkolwiek wniosków dotyczących zgodności między nimi jest nieco ryzykowne.

Pod tabelą 5.7 autor zamieścił zdanie: „We round all results to integer values in keV due to the rather sizable errors in the coupling constant”. To zdanie wydaje się niepotrzebne, sposób przedstawiania wyników wraz z niepewnością jest dobrze określony.

Rozdziały 3 i 5 podsumowane są wykresami, odpowiednio 3.2 oraz 5.1 i 5.2. W mojej opinii przydałoby się dokładniejszy opis tych wykresów, w szczególności osi y. Domyślam się, że „err” to niepewność przewidywania teoretycznego, a przedstawiona na wykresie niepewność kolejnych punktów to niepewność eksperymentu (zapewne podzielona przez „err”), bądź przewidywań sieciowych ( w przypadku wykresu 5.2)?

Podsumowując, przedstawioną rozprawę oceniam pozytywnie. Stwierdzam iż autor wykazał się dobrą znajomością zaawansowanych metod teoretycznych fizyki wysokich energii, w szczególności modeli efektywnych w sektorze oddziaływań silnych. Osiągnął oryginalne i wartościowe wyniki o istotnym znaczeniu dla dziedziny.

Stwierdzam, że przedstawiona przez pana Shahriyara Jafarzade rozprawa doktorska spełnia wszystkie zwyczajowe i ustawowe wymagania oraz wnoszę o dopuszczenie pana Shahriyara Jafarzade do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia naukowego doktora w dyscyplinie Nauki Fizyczne.



dr hab. Jakub Wagner