

Chiral perturbation theory and the low energy phenomenology of pseudoscalar mesons

V předkládané práci autor shrnuje výsledky studia různých aspektů Chirální poruchové teorie (ChPT) a jejích aplikací na popis dynamiky pseudoskalárních mezonů (π, K, η). ChPT představuje efektivní nízkoenergetickou kvantovou teorii pole, umožňující popis nejnižše položených hadronů ve spektru kvantové chromodynamiky (QCD). Je založena na nejobecnějších vlastnostech QCD, speciálně na symetrii, které tato fundamentální teorie silných interakcí nabývá v tzv. chirální limitě (t.j. v limitě nulových hmot N_f lehkých kvarků) a která je známa jako chirální symetrie $SU(N_f)_R \times SU(N_f)_L$. Tato symetrie je spontánně narušena tak, že symetrii základního stavu zůstává diagonální podgrupa $SU(N_f)_V$ a ve spektru se v důsledku Goldstonova teorému objeví $N_f^2 - 1$ Goldstonových bozonů. V reálné QCD s nenulovými (ale malými ve srovnání s vnitřní škálou teorie Λ_{QCD}) hmotami kvarků tyto Goldstonovy bozony získávají hmotu, zůstávají však nejllehčími hadrony ve spektru (odpovídajícími oktetu pseudoskalárních mezonů), oddělenými energetickou mezerou od ostatních negoldstonovských excitací. Toto a fakt, že Goldstonovy bozony interagují slabě v limitě nízkých energií, umožňuje popis jejich dynamiky pomocí efektivní teorie, organizované jako dvojitý rozvoj ve vnějších impulsech a hmotách lehkých kvarků. Původní verze teorie byla sformulována již v roce 1979 S. Weinbergem, do kanonické podoby pak přeformulována o šest let později H. Leutwylerem a J. Gasserem. Od té doby se vyvinula v univerzální standardní nástroj pro popis nízkoenergetické fenomenologie QCD a je stále v centru zájmu zejména v souvislosti s novou generací přesných experimentů zahrnujících tuto oblast (KTeV, NA48, DIRAC, E865, DAPHNE-KLOE).

Kromě přímých fenomenologických aplikací umožňuje ChPT zkoumat i fundamentální vlastnosti QCD, spojené zejména se scénářem spontánního narušení chirální symetrie, neboť nízkoenergetické vazbové konstanty efektivního Lagrangiánu ChPT přímo souvisí s odpovídajícími parametry uspořádání. Experimentální informace o těchto parametrech umožňují pak hlubší pochopení příslušného mechanismu. Na druhou stranu mechanismus spontánního narušení chirální symetrie je rozhodující pro organizaci chirálního rozvoje ChPT, založeného na předpokládané relativní velikosti příspěvků jednotlivých chirálních řádů. V současné době existuje několik možností, jak zacházet s formálním chirálním rozvojem (vedle původní tzv. Standardní ChPT i Generalizovaná ChPT a Resumovaná ChPT sformulované J. Sternem a spolupracovníky); předpoklady, na nichž jsou založené, však nejsou ověřeny z prvních principů a podléhají tedy experimentální prověrce. V důsledku toho je důležité nejen konfrontovat jednotlivé přístupy mezi sebou a s experimentálními daty, ale zabývat se i formálními vlastnostmi jednotlivých variant chirálního rozvoje, tedy jejich konvergencí, citlivostí na hodnoty parametrů uspořádání, reparametrizací řad pomocí fyzikálních parametrů a odhady příspěvků vyšších řádů. Předkládaná práce se zabývá právě těmito aspekty.

Práce je členěna do dvou částí: obecného teoretického úvodu a presentace vlastních původních výsledků formou komentovaných přetištěných článků (časopisecky publikovaných nebo k publikaci přijatých) a příspěvků do konferenčních sborníků.

První část práce si klade za cíl uvést čtenáře do problematiky. Autor zde připomíná základní vlastnosti QCD, její symetrie a způsob jejich realizace, základní pojmy a představy teorie efektivních Lagrangiánů a vysvětluje také souvislost mezi QCD a ChPT. Druhá kapitola je věnována různým variantám organizace chirálního rozvoje, jsou uvedeny příslušné Lagrangiány ve vedoucím řádu, diskutován počet nezávislých parametrů a ilustrovány problémy spojené s různými přístupy k formálním manipulacím s chirálním rozvojem. Třetí kapitola shrnuje současné poznatky o jednotlivých fázích QCD v závislosti na počtu lehkých kvarků a důsledcích pro ChPT, dotýká se také problémů spojených s rolí s -kvarku a efektu vakuových fluktuací párů $s\bar{s}$ na parametry uspořádání v QCD s $N_f = 2$ a $N_f = 3$. Krátce je také zmíněna související problematika skalárních mezonů a narušení Zweigova pravidla ve skalárním sektoru. Třetí kapitola se věnuje dispersním

relacím a rekonstrukčnímu teorému pro amplitudy $2 \rightarrow 2$ v ChPT, který je pak využíván ve druhé části práce. Pátá kapitola stručně diskutuje rozšíření ChPT o nejnižší ležící mezonové rezonance, QCD v limitě nekonečného počtu barev a je sformulována nejjednodušší forma tzv. Chirální teorie rezonancí (RChT).

První část práce hodnotím jako zdařilý stručný úvod do ChPT a obecněji do nízkoenergetické QCD. Je napsána jasně a srozumitelně i pro nespécialistu, může sloužit jako vhodný text pro zájemce o problematiku a přehledný úvod do speciální literatury.

Druhá část práce obsahuje jednotlivé výsledky, které jsou vždy stručně uvedeny a zhodnoceny a pak následuje přetisk příslušné časopisecké publikace nebo příspěvku do konferenčního sborníku.

První publikace se zabývá procesem $\eta \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma \gamma$ počítaným do jedné smyčky v Generalizované ChPT. Tento proces je zajímavý svou citlivostí na odchylky od Standardní ChPT v kinematické oblasti mimo rezonanční π^0 pól, způsobené velkou citivostí (off-shell) $\eta \pi \eta^* \pi$ vertexu. Pro jisté hodnoty parametrů odhadnutá neurčitost pocházející z neznalosti $O(p^4)$ konstant umožňuje v principu rozlišit mezi standardní a generalizovanou předpovědí, byť zatím neexistují příslušná experimentální data.

Druhá publikace se zabývá aplikací Resumované ChPT na jednoduchý, ale fenomenologicky zajímavý případ predikce rozpadové konstanty η mezonu F_η . Na tomto příkladu lze ilustrovat většinu charakteristických rysů tohoto přístupu k chirálnímu rozvoji, jako je výběr vhodné "bezpečné" veličiny s globálně konvergentním chirálním rozvojem, modifikace striktního chirálního rozvoje a konstrukce tzv. holého rozvoje, reparametrizace chirální řady a odhad vlivu "zbytků". Je také diskutována kompatibilita současných experimentálních určení F_η a nízkoenergetické vazbové konstanty L_5 .

Třetí publikace prezentuje výsledky aplikace Resumované ChPT na pozorovatelné spojené s $\eta \pi$ rozptylem, který se ukazuje být zajímavou "teoretickou laboratoří" pro zkoumání formálních vlastností různých variant chirálních rozvoje, jejich konvergence a stability a testování plausibility jednotlivých teoretických předpokladů. Je zde zkoumána celá řada zajímavých aspektů chirálních rozvoje, porovnány predikce standardního a resumovaného přístupu a numericky testovány jednotlivé kroky vedoucí od striktního chirálního rozvoje k fyzikálně použitelné predikci. Je zde navržena a použita nová metoda odhadu "zbytků" pomocí "saturace rezonancemi" a reinterpretovaná Generalizovaná ChPT jako prostředek k odhadu nepřeností způsobených vyššími řády v rozvoji v kvarkových hmotách. I když v současné době nejsou dostupná experimentální data pro tento proces, v principu mohou být výsledky práce testovány nepřímo v jiných procesech.

Výsledky výše uvedených publikací jsou přehledně shrnuty v závěrečné kapitole práce.

Druhou část práce hodnotím jako zdařilou, zabývající se množstvím témat spojených s aktuální otázkou mechanismu spontánního narušení chirální symetrie a s tím souvisejících problémů konvergence a stability chirálního rozvoje. Klade si (a odpovídá na) mnohé otázky, obvykle při praktických aplikacích ChPT opomíjené, nicméně důležité pro interpretaci jejích predikcí. I co se týká formální a grafické stránky je práce zdařilá s minimem překlepů a chyb.

Úroveň práce dokládá, že se doktorand velmi dobře orientuje v dané problematice, že zvládl technicky náročné analytické i numerické výpočty a dovede výsledky erudovaně interpretovat a jasně a přehledně prezentovat. Oceňuji také jeho pečlivost a píli, s níž přistupoval k doktorandskému studiu a k řešení netriviálních fyzikálních problémů jež byly tématem disertace práce. Navrhují proto, aby práce byla uznána jako doktorandská a po úspěšné obhajobě autor obdržel titul PhD.

V Praze 1.6.2008