

## Spontaneous symmetry breaking in strong and electroweak interactions

V předkládané disertační práci autor shrnuje výsledky studia různých fyzikálních systémů, popsatelných v termínech kvantové teorie pole, které vykazují efekt spontánního narušení spojitě vnitřní symetrie. Princip symetrií, jejich narušení a způsob jejich realizace v Nambu-Goldstonově modu na Hilbertově prostoru stavů uvažovaného fyzikálního systému je jedním z nejplodnějších paradigmat současné teoretické fyziky elementárních částic a fyziky pevných látek - idea spontánního narušení elektroslabé symetrie  $SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$  spolu s Higgsovým mechanismem je nedílnou součástí standardního modelu elementárních částic (SM), spontánní narušení chirální symetrie  $SU(N_f)_L \times SU(N_f)_R \rightarrow SU(N_f)_V$  v kvantové chromodynamice (QCD) je základem nízkenergetické fenomenologie hadronů popsané v rámci tzv. chirální poruchové teorie, spontánní narušení elektromagnetické  $U(1)$  symetrie zodpovídá za jev supravodivosti v pevných látkách atd. Ve své práci se autor zaměřil jednak na zkoumání netriviálních problémů spojených s dosud ne plně vyřešenými aspekty teoretického popisu spontánního narušení symetrie v nerelativistických systémech, jednak na aplikace již zavedeného aparátu v nových netriviálních situacích a na návrh alternativního mechanismu spontánního narušení symetrie (tzv. dynamického narušení symetrie) a generování hmot v rámci SM.

Disertační práce se skládá ze dvou částí: první představuje teoretický úvod a stručně shrnutí dosazených výsledků, druhá obsahuje reprinty článků, publikovaných během doktorandského studia v inženýrských časopisech (samostatně nebo se spoluautory).

Úvodní část obsahuje kromě "povinné" kapitoly o spontánním narušení spojitých symetrií a Goldstonově teorému také pedagogicky velmi zdařilou pasáž ilustrující obecné pojmy na konkrétním příkladě Heisenbergova feromagnetu, lineárního sigma modelu a Nambu-Jona-Lasiniova modelu jako příkladu dynamického narušení symetrie.

Následující (třetí) kapitola je věnována vlastním autorovým výsledkům spojených s problematikou počtu Goldstonových bosonů v nerelativistických systémech. V úvodu je stručně zmíněn Nielsenův-Chadbyův teorém, který je základním exaktním výsledkem, dávajícím do vzájemné souvislosti počet Goldstonových bosonů typu I a II s počtem narušených generátorů symetrie, a Shaeferův (přesněji Shaeferův-Sonův-Toublanův-Verbaarschotův) teorém, který formuluje nutnou podmínku pro "anomálii" (t.j. jiný, než rovný počet narušených generátorů, jak je tomu v relativisticky invariantních systémech) počet Goldstonových bosonů, (t.j. pro přítomnost Goldstonových bosonů typu II). V souvislosti s posledním teorémem autor podává jednoduchý, ale velmi názorný a intuitivní argument indikující možnou nutnost modifikovaného započítávání Goldstonových bosonů, které se váží na noetherovské proudy, pro něž komutátor nulových komponent má nemulovou vakuovou střední hodnotu (tedy argument pro platnost tvrzení obráceného k Shaeferově teorému). Vlastní autorův výsledek představuje ověření tohoto tvrzení a detailní analýzu na stromové úrovni v konkrétním případě lineárního  $SU(2) \times U(1)$  sigma modelu s nemulovým chemickým potenciálem, užívaným jako jednoduchý model pro kaonovou kondenzaci v CFL fázi QCD, v lineárním  $SU(3) \times U(1)$  sigma modelu pro  $SU(3)$  sextet a v obecném lineárním sigma modelu s grupou symetrie  $G$  a chemickým potenciálem sruzeným s jedním nebo více zachovávajícími se náboji. Kromě toho, že tento

výsledek představuje cenný první krok k případnému obecnému důkazu "inverzního" Shaeferova teorému, dává také netriviální příklad systému, pro nějž platí v Nielsenově-Chadhoově teorému ostrá nerovnost (fázové rozložení v  $SU(3) \times U(1)$  sigma modelu).

Čtvrtá kapitola se zabývá problematikou spontánního narušení elektroslabé  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  symetrie a představuje alternativu k standardnímu mechanismu s elementárním Higgsovým dubletem. Jako první krok je provedena neporuchová analýza zjednodušeného modelu s globální  $U(1)_{V_1} \times U(1)_{V_2} \times U(1)_A$  symetrií se dvěma Diracovými spinory a komplexním skalárním polem s Yukawovou vazbou. Jsou odvozeny relevantní Wardovy identity a zformulovány Schwingerovy Dyakovy rovnice ve vhodném přiblížení, umožňujícím numerickou analýzu možného spontánního narušení axiální  $U(1)_A$  symetrie. Scénář dynamického narušení symetrie je pak numericky potvrzen v oblasti silné yukawovské vazby, fermiony získávají hmotu a ve spojitosti se ve shodě s Goldstonovým teorémem objevuje kompozitní Goldstonův boson. V dalším je naznačeno zalesnění tohoto mechanismu na realistický případ odpovídající standardnímu modelu, rozšíření (o pravé komponenty neutrinových polí a dva komplexní skalární dublety se "právním" znaménkem hmotového členu) s yukawovskou vazbou na fermiony SM a křížce (konceptuálně očekávané vlastnosti navrženého schématu. Možnost generovat fermionové hmoty čtení nízkou silnou yukawovskou vazbou představuje samo o sobě velmi zajímavý výsledek, v budoucnu by byla zajímavá i podrobná fenomenologická analýza navrženého reálného světa modelu.

Pátá kapitola se zabývá studiem QCD při nízkých teplotách a dostatečně velké hustotě. V této dekonfinované oblasti fázového diagramu, která má přímou fyzikální relevanci pro jádrové podmínky v blízkosti povrchů nově vzniklých hvězd a potenciálně i pro popis srážek těžkých iontů, může docházet k přechodu k novému typu supravodivé fáze v pevných látkách. Barevná kalibrační  $SU(3)_C$  symetrie může být narušena spontánně dikvarkovým kondensátem, vznikajícím mechanismem podobným BSC mechanismu, což vede k tzv. barevné supravodivosti. V této oblasti jsou popsány možné scénáře kondensace dikvarkového barevného sextetu, odvozené z explicitního narušení  $SU(3)_C \times U(1)_B \rightarrow (Z_2)^3$  resp.  $O(2)$ ,  $O(3)$  nebo  $U(1)$  a  $U(2)$ . Je popsán nezávislý, velmi fenomenologický model dikvarkové kondensace založený na lineárním  $SU(3)_C \times U(1)_B$  modelu pro  $SU(3)_C$  sextet, vyšetřována fázová struktura modelu v závislosti na teplotě gluonových polí. Scénář je podpořen konkrétními výpočty míry omezení tohoto mechanismu typu Nambu-Yona-Lasinio s efektivní čtyřfermionovou interakcí indukovanou vznikem efektivního skalárního glueballu, který je barevným oktetem a který může být definován jako efektivním stupněm volnosti pro uvažovanou oblast fázového diagramu QCD. Konečným cílem je získání jako selfkonsistentní řešení rovnice pro gap v aproximaci stupně volnosti v závislosti na formě čtyřfermionové interakce a použitá aproximace preferují scénář  $(Z_2)^3 \times U(1)_B \rightarrow O(3)$ . Ve druhé části této kapitoly je uvažován další zjednodušený model s kvarky a gluony QCD, která je vhodným modelem pro studium efektů nemulového členu v interakci s kvantovými kvantovými teorie pole na mřížce. Je zkonstruována efektivní nízkohustotní teorie (pseudogoldstonovské bosony spontánně narušené chirální symetrie pro různé typy kvarků), založená na reprezentaci Goldstonových polí pomocí reálných skalárních a imaginárních jednotkových vektorů. Tento popis je alternativou k popisu pomocí reálných skalárních a imaginárních matic, výhradně užívanému v dosavadní literatuře, a jeho výhodou je především matematická výhodnost. Autor provedl podrobné srovnání obou alternativních popisů (matematicky ekvivalentní) a našel i globální minimum statického potenciálu odpovídající bodu na mřížce, který byl v dosavadní literatuře brán pouze jako ansatz. V tomto smyslu je tato práce alternativní teorie pro dvoubarevou QCD jen zajímavým teoretickým příkladem, umožňuje i lepší pochopení jejích vlastností.

Šestá kapitola je shrnutím již uvedených výsledků a naznačuje směr dalšího zkoumání.

Celá práce působí vyborným dojmem, navíc je podpořena značným počtem autorových publikací v recenzovaných časopisech a příspěvků na konferencích. Úroveň práce (i zmiňovaných publikací) ukazuje, že autor získal obdivuhodně široké spektrum problematiky moderní kvantové teorie pole a je vybaven velmi hluboké znalostí nejen technických a početních postupů ale i vynikající intuící a náhledy. Závěr tedy svědčí o schopnosti autora netriviálně zobecňovat známé postupy a přemíslet je do nových souvislostí, o schopnosti provádět komplikované analytické výpočty a interpretovat jejich výsledky. Práci není co vytknout, je napsána velmi promysleně a pečlivě. Formální stránce je bezchybná, nenalezl jsem v ní věcné chyby ani nepřesnosti. Na závěr autor po úspěšné obhajobě práce obdržel titul PhD.

V Praze 23. 5. 2019

RNDr. J. Novotný, CSc., ÚČJF MFF UK