საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემია

ქართული ენციკლოპედიის ი. აბაშიძის სახელობის მთავარი სამეცნიერო რედაქცია

კვანტური ქრომოდინამიკა

კვანტური ქრომოდინამიკა, ფ ე რ ე ბ ი ს დინამიკა (ინგლ. Quantum chromodynamics, QCD), ჰადრონებისა და მათი შემადგენელი ნაწილაკების – კვარკებისა და გლუონების – ურთიერთქმედების აღმწერი ველის კვანტური თეორია. თანამედროვე წარმოდგენებით, ატომბირთვის შემადგენელი პროტონები და ნეიტრონები შედგება სხვადასხვა „ფერის" (ნ. ბოგოლიუბოვი, ბ. სტრუმინსკი, ა. თავხელიძე ; აშშ-ში მოღვაწე იაპონელი მეცნიერები მ. ჰანი და ი. ნამბუ) სამ-სამი კვარკისგან და მათი შემაკავშირებელი „ფერადი" ურთიერთქმედების გადამტანი გლუონებისგან g (ი. ნამბუ). „ფერადი" შემადგენელი ნაწილაკების არსებობა პროტონებსა და ნეიტრონებში განაპირობებს მათ ძლიერ (ბირთვულ) ურთიერთქმედებას, რაც სამყაროს ქიმიური მრავალფეროვნების (და სიცოცხლის არსებობის) საფუძველია. არსებობს (აღმოჩენილია და ექსპერიმენტულად შესწავლილია) 6 სხვადასხვა ტიპის (ე. წ. ა რ ო მ ა ტ ი ს) კვარკი q და ამდენივე ანტიკვარკი q. შესაბამისად, არსებობს მათი სხვადასხვა კომბინაციით შედგენილი რამდენიმე ასეული ჰ ა დ რ ო ნ ი – ძლიერად (ბირთვულად) ურთიერთქმედი ელემენტარული ნაწილაკი (იხ. აგრეთვე სტ. ელემენტარული ნაწილაკებისა და ბირთვის ფიზიკა). ექსპერიმენტულად დადასტურებულია გლუონების არსებობაც. გლუონების გამოსხივებისა და შთანთქმისას იცვლება გამომსხივებელი და შთამნთქმელი ნაწილაკების იმპულსები, ე. ი. ორივე მათგანზე მოქმედებს ძალა. გლუონების გამოსხივებისა და შთანთქმის ინტენსივობა განისაზღვრება გამომსხივებლის (შთამნთქმელის) „ფერის" სიდიდით. გლუონებს თვითონაც აქვს „ფერი", ამიტომ ის კვარკების მსგავსად გლუონებს ასხივებს (და შთანთქავს). ამდენად, კ. ქ. არაწრფივი თეორიაა, რაც მის საფუძველზე გამოთვლების შესრულებას ძალზე ართულებს. ექსპერ. მონაცემები მიუთითებს „ფერადი ძალის", „ფერის" მიმართ სრულ სიმეტრიაზე. მათ. თვალსაზრისით, კ. ქ. არის ყალიბრული ველის კვანტური თეორია, რ-საც 8 ფერადი, უმასო, ვექტორული (ფერის გარდაქმნათა ჯგუფის მიმართ), ħ სპინის მქონე გადამტანი – გლუონი შეესაბამება.

კ. ქ-ის თავისებურებაა „ფერადი ძალის" მანძილზე დამოკიდებულების ხასიათი: ყველა სხვა ცნობილი ურთიერთქმედების ინტენსივობა კლებულობს ობიექტებს შორის მანძილის ზრდასთან ერთად. კ. ქ-ს კი აქვს ე. წ. ა ს ი მ პ - ტოტური თ ა ვ ი ს უ ფ ლ ე ბ ა "ფერადი ძალა" მცირდება კვარკებს შორის მანძილის შემცირებისას. ასიმპტოტური თავისუფლების ფიზიკურ მიზეზად მიიჩნევენ „ფერის" ა ნ ტ ი ე კ რ ა ნ ი რ ე ბ ი ს მოვლენას, რაც კ. ქ-ის დამახასიათებელი უნდა იყოს: ფერადი კვარკის გარშემო წარმოქმნილი გლუონების ღრუბელს თვითონაც აქვს „ფერი" და ღრუბლის რადიუსის ზრდასთან ერთად ეს „ფერადი" მუხტი შეიძლება „გაძლიერდეს", ხოლო რადიუსის შემცირებისას – „შემცირდეს". მათემატიკურად მკაცრი გამოთვლების შესრულება (1973, დ. გროსი, ფ. უილჩეკი, ჰ. დ. პოლიტცერი) შესაძლებელი გახდა არააბელური ყალიბრული ველების მათ. თეორიის მეთოდებით. გამოთვლებით მიღებული შედეგები ექსპერიმენტულად დასტურდება ჰადრონებზე (პირველ რიგში, პროტონებსა და ნეიტრონებზე) მაღალი ენერგიის ელექტრონების ღრმად არადრეკადი გაბნევის პროცესების შესწავლით. მნიშვნელოვანი ინფორმაცია მიღებულია აგრეთვე კვარკონიუმის თეორიული და ექსპერ. შესწავლით. კერძოდ, მძიმე კვარკონიუმის (bb კვარკების ბმული მდგომარეობა) დაშლისას უნდა ჩნდებოდეს სამი გლუონი, რ-ებმაც სამი ჰადრონული ჭავლი უნდა წარმოქმნას. სათანადო კუთხური განაწილების მქონე ასეთი ჭავლების წარმოქმნა დადასტურებულია ექსპერიმენტებით, რაც ვექტორული გლუონების არსებობის (და კ. ქ-ის ძირითადი დებულებების სამართლიანობის) ექსპერ. დადასტურებად მიიჩნევა.

კ. ქ-ის ჩარჩოებში ხერხდება მცირე და დიდ მანძილებზე მიმდინარე მოვლენების წვლილთა გამოცალკევება – ე. წ. ფაქტორიზაცია შეშფოთებათა თეორიის ნებისმიერ რიგში. ეს, ასიმპტოტური თავისუფლების მოვლენის გათვალისწინებით, შესაძლებელს ხდის ჰადრონების მონაწილეობით მიმდინარე რეალური პროცესების თეორიულ შე-სწავლას, კერძოდ, დიდ ჰადრონულ კოლაიდერზე მაღალი ენერგიის პროტონების დაჯახებების შედეგების გამოთვლას.

კვარკებს შორის მანძილის ზრდასთან ერთად ქრომოდინამიკური ურთიერთქმედება ძლიერდება. შედეგად, მათემატიკურად არაკორექტული ხდება შეშფოთებათა თეორიაზე დაფუძნებული გამოთვლები (კერძოდ, არ შეიძლება ე. წ. დ ა ბ ალ ე ნ ე რ გ ე ტ ი კ ულ ი თეო - რ ე მ ე ბ ი ს უშუალო გამოყენება). კონფაინმენტის დასაბუთება კ. ქ-ის ჩარჩოებში "ათასწლეულის ამოცანად" არის გამოცხადებული. ე. წ. მესერზე რიცხვითი გამოთვლები ადასტურებს კონფაინმენტის შესაძლებლობას. ამდენად, კ. ქ-ის ჩარჩოებში, ექსპერიმენტულად დამზერადი ჰადრონები (სამკვარკიანი ბარიონები, კვარკ-ანტიკვარკისგან შედგენილი მეზონები, აგრეთვე ეგზოტიკური ჰადრონები), რ-ებიც ერთმანეთს დიდი მანძილით შეიძლება დაშორდეს, მხოლოდ უფერო ობიექტები უნდა იყოს.

ს ა ქ ა რ თ ვ ე ლ ო შ ი კ. ქ-ის პრობლემებს იკვლევდნენ თსუის მაღალი ენერგიების ფიზ. ინტში, საქართვ. მეცნ. აკად. ე. ანდრონიკაშვილის სახ. ფიზ. ინტსა და საქართვ. მეცნ. აკად. ა. რაზმაძის სახ. მათ. ინ-ტში. არაწრფივი ველის თეორიის მოდელებში ვაკუუმის პოლარიზაცია და მისი გავლენა ნუკლონებისა და მეზონების ურთიერთქმედებაზე შესწავლილია მ. მირიანაშვილის მიერ. კრიტიკულად გაანალიზდა რენორმირებული მუხტის სასრულობის პრობლემა სხვადასხვა მიახლოებითი მეთოდის გამოყენების არეში, როგორც ზოგადი დისპერსიული წარმოდგენებით (მ. მირიანაშვილი), ისე ფუნქციონალური (კონტინუალური) ინტეგრალის მეთოდის საფუძველზე (ნ. პოლიევქტოვ-ნიკოლაძე). შესწავლილია ჰადრონთა კვარკ-გლუონური შედგენილი მოდელი სინათლის ფრონტის ცვლადებში (ვ. გარსევანიშვილი, ა. თავხელიძე, ა. კვინიხიძე, ზ. მენთეშაშვილი, ლ. სლეპჩენკო, ა. ხელაშვილი). ნაპოვნია კვარკული თვლის წესების კვანტურ-ქრომოდინამიკური შესწორებები (ლ. სლეპჩენკო და სხვ.). მათემატიკურად მკაცრი ინტეგრალური წარმოდგენების გამოყენებით დამტკიცდა ჰადრონების ფორმფაქტორთა ავტომოდელური ქცევა (ა. თავხელიძე, ა. კვინიხიძე, ბ. მაღრაძე). გამოკვლეულია გლუონის პროპაგატორის ინფრაწითელი ქცევა და აგებულია შვინგერ-დაისონის განტოლებათა ცხადი ამონახსნი, რ-იც შეესაბამება კვარკონიუმების სპექტრებში დამზერილი წრფივად ზრდადი და კულონური პოტენციალების სუპერპოზიციას (ლ. ვაჩნაძე, ნ. კიკნაძე, ქ. ნატროშვილი, ა. ხელაშვილი, ვ. ხმალაძე). გლუონის ასეთი პროპაგატორის გამოყენებით შესწავლილია კვარკის პროპაგატორის ანალიზური თვისებები (ვ. გოგოხია), გლუონური და კვარკული კონდენსატები (ქ. ნატროშვილი, კ. ტურაშვილი, ა. ხელაშვილი, ვ. ხმალაძე). შესწავლილია აგრეთვე ეფექტური კირალური ლაგრანჟიანების რენორმირების საკითხები სიმეტრიის დარღვევის შემთხვევისათვის და მიღებულია დაბალი ენერგიების ზღურბლური თეორემების შესწორებები კირალური სიმეტრიის ზღვარში (ა. ხელაშვილი, ვ. ხმალაძე). განვითარებულია არაპერტურბატული (შეშფოთებათა თეორიის მიღმა მოქმედი) მეთოდები. ველის კვანტური თეორიის ზოგადი პრინციპებიდან გამომდინარე, დადგინდა სასრული ენერგიების ჯამთა წესები (ა. თავხელიძე, ა. კვინიხიძე და სხვ.), რაც საფუძვლად დაედო მაღალ და დაბალ ენერგეტ. არეებში მიმდინარე პროცესების ფუნდამენტური კანონზომიერების – გლობალური დუალურობის – დასაბუთებას. ამ მეთოდის შემდგომმა განვითარებამ განაპირობა კვანტური სიმებისა და სუპერსიმების მოდელების შესწავლის აუცილებლობა. ანალიზური თვისებები და ასიმპტოტური შეფასებები განზოგადებულია ღრმად არადრეკადი (ინკლუზიური) პროცესებისათვის (მ. მესტვირიშვილი, ა. ლოგუნოვთან ერთად). ინტენსიურად მიმდინარეობს კვლევები კ. ქ-ში ტოპოლოგიური მეთოდების გამოყენების მიმართულებით (მ. ელიაშვილი, გ. ციციშვილი, გ. ჯორჯაძე).

ლიტ.: Е ф р е м о в А. В., Р а д ю ш к и н А. В., Теоретико-полевой подход к процессам с большой передачей импульса, «ТМФ», 1980, т. 44; И н д у р а й н Ф., Квантовая хромодинамика, М., 1986; И ц и к с о н К., З ю б е р Ж. Б., Квантовая теория поля, М., 1984; Общие принципы квантовой теории поля, М., 1987; О к у н ь Л. Б., Лептоны и кварки, 2 изд., М., 1990; С л а в н о в А. А., Ф а д д е е в Л. Д.,

Введение в квантовую теорию калибровочных полей, 2 изд., М., 1988; С м о л я н о в О. Г., Ш а в г у л и д з е Е. Т., Континуальные интегралы, М., 1990, http://lib.mexmat.ru/ books/; M u e l l e r A. H., Perturbative QCD at high energies, «Physica. Reports», 1981, ტ3. 73.

ა. ხელაშვილი