

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი



I სემინარი

ზნელი მატერიის ძიება დიდ ადრონულ კოლაიდერზე

თამარ ზაქარეიშვილი

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი,
სადოქტორო პროგრამა: ფიზიკა
მოდული: ელემენტარული ნაწილაკები და კვანტური ველეები

ხელმძღვანელი: თამარ ჯობავა, ფიზ-მათ. მეცნიერებათა დოქტორი

თბილისი, 2018

სარჩევი

ანოტაცია.....	3
1 შესავალი.....	4
2 ბნელი მატერიის მტკიცებულება.....	4
3 ბნელი მატერიის მოდელი: სუსტად ურთიერთქმედი მასიური ნაწილაკი.....	6
4 ბნელი მატერიის სიგნალის წინასწარმეტყველება და მისი დაფიქსირება.....	7
4.1 ძიება კოლაიდერებზე.....	7
5 ბნელი მატერიის ურთიერთქმედება სტანდარტული მოდელის ნაწილაკებთან.....	9
5.1 ეფექტური ველის თეორია.....	9
5.2 გამარტივებული მოდელები.....	10
6 ბნელი მატერიის ძებნა ატლას ექსპერიმენტზე.....	11
6.1 CERN - ბირთვული კვლევების ევროპულ ორგანიზაცია.....	11
6.2 LHC - დიდი ადრონული კოლაიდერი.....	11
6.3 ატლას ექსპერიმენტი.....	12
6.4 ბნელი მატერიის წარმოქმნა და აღმოჩენა ატლას ექსპერიმენტზე.....	13
დასკვნა.....	19
გამოყენებული ლიტერატურა.....	20

ანოტაცია

ასტროფიზიკოსებმა იციან რომ სამყაროს სტანდარტული მოდელის ნწილაკები სამყაროს მასის მხოლოდ 5%-ს შეადგენს. ფიზიკოსებს სჯერათ რომ დანარჩენი 95% შედგება ბნელი მატერიისაგან - 24%, ხოლო 71% კი ბნელი ენერგია. ბნელი მატერია შედგება ნეიტრალური, სუსტად ურთიერთქმედი ელემენტარული ნაწილაკებისაგან, რომლებიც არ არიან სტანდარტული მოდელის ნაწილი. ბნელი მატერიის ნაწილაკები შესაძლოა წარმოიქმნან ცერნ-ში დიდ ადრონული კოლაიდერზე (CERN LHC). ნაწილაკების კოლაიდერზე ეს ნაწილაკები შეიძლება წარმოიქმნან წყვილებად, რაიმე უცნობი შუალედური მდგომარეობით. საბოლოო მდგომარეობის შემადგენელი ბნელი მატერიის ნაწილაკები (WIMP - Weakly Interacting Massive Particle) პირდაპირ არ დაიკვირვება, მაგრამ მამთი არსებობა შეიძლება დადასტურდეს ხილულ ნაწილაკებთან ურთიერთქმედებით.

განხილულია ბნელი მატერიის წარმოქმნა ადრონული არხით დაშლილ W და Z ბოზონებთან ერთად პროტონ-პროტონული შეჯახებისას 13 ტევი მასათა ცენტრის ენერგიაზე ატლას ექსპერიმენტში. გაანალიზებულია შემთხვევები დიდი განივი ნაკლული იმპულსით და ადრონული ჭავლის მოთხოვნით, რომელიც თავსებადია W და Z ბოზონითან. მონაცემები თანხვედრაშია სტანდარტული მოდელის წინასწარმეტყველებასთან და გადმოცემულია ეფექტური ველის თეორიის და ე.წ. გამარტივებული მოდელის მეშვეობით, რომლებიც შეიცავს ბნელ მატერიას.

Annotation

Astrophysicists now know that 80% of the matter in the universe is 'dark matter', composed of neutral and weakly interacting elementary particles that are not part of the Standard Model of particle physics. It is expected that dark matter particles can be produced at the CERN LHC. At particle colliders, dark-matter particles may be produced in pairs via some unknown intermediate state. The final-state WIMPs (Weakly Interacting Massive Particle) are not directly detectable, but their presence can be inferred from the recoil against a visible particle.

A search is presented for dark matter produced in association with a hadronically decaying W or Z boson using 3.2 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s}=13 \text{ TeV}$ recorded by the ATLAS detector at the Large Hadron Collider. Events with a hadronic jet compatible with a W or Z boson and with large missing transverse momentum are analysed. The data are consistent with the Standard Model predictions and are interpreted in terms of both an effective field theory and a simplified model containing dark matter.

1 შესავალი

ბნელი მატერია არის რაღაც განსხვავებული იმისაგან, რასაც დედამიწაზე შევხვედრილვართ. ჩვენ ყველანი შევდგებით ნეიტრონებისაგან, პროტონებისაგან და ელექტრონებისაგან. ელემენტარული ნაწილაკების ფიზიკის ექსპერიმენტებიდან ცნობილია, რომ ნაწილაკების ერთბლიობა ერთმანეთთან ურთიერთქმედებს, რაც ქმნის სამყაროს რომელსაც ჩვენ ვხედავთ. სტანდარტული მოდელი აღწერს ამ ნაცნობ ნაწილაკებს და მათ ურთიერთქმედებებს. მაგრამ ასტრონომიული გაზომვები, კომპიუტერზე დაფუძნებული სიმულაციები და თეორიული გამოთვლები გვეუბნება რომ სტანდარტული მოდელის ნაწილაკები სამყაროს მასის მხოლოდ 5%-ს შეადგენს. რისგან შედგება დანარჩენი 95%? ფიზიკოსებს სჯერათ რომ სამყაროს 24% ბნელი მატერიაა, ხოლო 71% კი ბნელი ენერჯია [1].

2 ბნელი მატერიის მტკიცებულება

1933 წელს ფრიც ცვიკიმ გაზომა გალაქტიკების კლასტერის, კომას მასა. მისი ტექნიკა იმაში მდებარეობდა რომ დოპლერის წანაცვლებით დაადგინა გალაქტიკების სიჩქარეები, ვირიალის თეორემის გამოყენებით შეაფასა გრავიტაციული პოტენციალი და გამოთვალა ის მასა რომელსაც ეს პოტენციალი უნდა წარმოექმნა. მან აღმოაჩინა რომ ამისათვის კლასტერის ხილული მასა 400-ჯერ უფრო მეტი უნდა ყოფილიყო. ეს დაკვირვება მალე დადასტურდა მსგავსი გაზომვებით, რომელიც ჩაატარა სმიტმა ვირგო კლასტერზე.

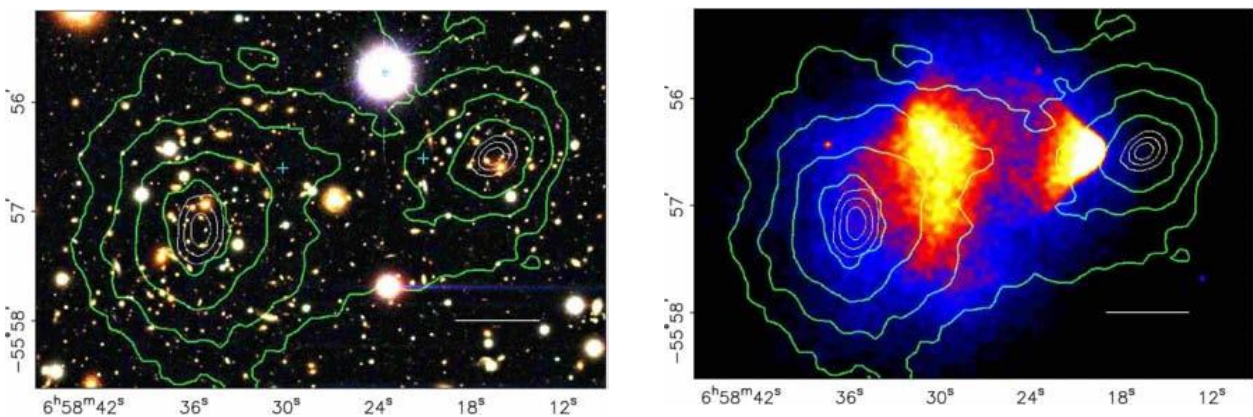
ჩვენ ვიცით რომ გალაქტიკების კლასტერების შემადგენელი ატომების უმრავლესობის დამზერა არ ხდება ხილული სინათლით. რადგან კლასტერები ძალიან დიდ გრავიტაციულ პოტენციალურ ორმოს წარმოქმნიან, ამიტომ იოლია წყალბადის გაზის გაჟონვა და კლასტერის მთლიანი მოცულობის შევსება. ეს ატომები დიდ სიჩქარეს იძენენ და შეჯახებისას ასხივებენ რენტგენის სხივებს. რენტგენულ სურათებზე კლასტერები ჩანს როგორც მანათობელ გაზის ბურთულები. ეს მაინც არ ხსნის იდუმალებას. რენტგენის გამოსხივების წარმომქმნელი გაზი მთლიანი მასის 20%-ს წარმოადგენს და მაინც ვერ ხსნის ღრმა პოტენციალური ველის არსებობას. ამისათვის ახალი პოსტულატის შემოტანა ხდება საჭირო, რომელიც ამბობს რომ კლასტერები ასევე სავსეა ახალი, უხილავი, სუსტად ურთიერთქმედი ნაწილაკებით.

1970-იან წლებში ასტრონომებმა სისტემატიურად დაიწყეს გალაქტიკების ბრუნვითი სიჩქარის პროფილის, ე.წ. ბრუნვითი მრუდების გაზომვა. მოსალოდნელი იყო რომ გალაქტიკის მასა კონცენტრირებულია იქ სადაც ვარსკვლავები იმყოფებიან. ამ რეგიონის გარეთ კი, კეპლერის კანონის თანახმად, სიჩქარეები უნდა დაეცეს მანძილიდან ფესვის უკუპროპორციულად ($1/\sqrt{r}$). აღმოჩნდა რომ სინამდვილეში სიჩქარეები მუდმივი რჩება, ან ოდნავ იზრდება კიდევაც.

კოსმოსური მიკროტალღური ფონური გამოსხივების დეტალურმა გაზომვებმა (არა მხოლოდ საშუალო ინტენსივობის გაზომვამ, არამედ ფლუქტუაციების სპექტრმაც) დამატებითი იფორმაცია მოგვაწოდა ბნელ მატერიაზე. მიკროტალღური ფონური გამოსხივება წარმოიშვა რეკომბინაციის პერიოდში, როდესაც სამყაროს შემავსებელი წყალბადი (1 ევ-ი ტემპერატურის) გარდაიქმნა იონიზებული პლაზმიდან გამჭვირვალე ნეიტრალურ გაზად. ფონური გამოსხივების ფლუქტუაციების ფურიე სპექტრის ანალიზით შესაძლებელია ამ გარემოს დისიპაციის გაზომვა. უახლესი გაზომვებით (WMAP სატელიტით) მოითხოვება გარემოს 20% იყოს წყალბადის გაზი და 80% კი სუსტად ურთიერთქმედი არარელატივისტური ნაწილაკები. ეს გაზომვები შესაძლებელია გადაყვანილი იქნას ახლანდელი სამყაროს სრული ენერჯის ატომურ და ბნელი მატერიის წილებში, $\Omega_i = \rho_i/\rho_{tot}$

$$\Omega_{ატ} = 0.042 \pm 0.003,$$

$$\Omega_{ბმ} = 0.20 \pm .02$$



ნახ.1. 1E0657-558 კლასტერის სურათები: ოპტიკური სურათი - ჰაბლის ტელესკოპით მიღებული, რენტგენული სურათი - ჩანდრა ტელესკოპით მიღებული, მასის სიმკვრივის კონტურები - გრავიტაციული ლინზირების რეკონსტრუქციით მიღებული.

ყველა, ზემოთხსენებულ, სისტემაში ბნელი მატერიის დაკვირვება მოხდა მისი გრავიტაციური გავლენით. შეიძლება ვიფიქროთ, რომ ეს ყველაფერი შეიძლება აიხსნას გრავიტაციის კანონის მოდიფიცირებით და არა მატერიის ახალი ფორმის შემოყვანით. მაგრამ ამ დაკვირვებების მატერიის ახალი ფორმის შემოყვანით გამართლდა გრავიტაციული ლინზირების ფენომენით (ნახ.1). პირველი სურათი არის გალაქტიკის ოპტიკური სურათი, ხილული მატერია, რომელიც როგორც ვთქვით მატერიის მხოლოდ რამოდენიმე პროცენტს შეადგენს. მეორე სურათი - რენტგენული სურათი გვიჩვენებს სადაა კლასტერის გაზის გროვები მოთავსებული. კონტურები კი გვიჩვენებს მასის სრულ სიმკვრივეს კლასტერში, რომელიც გაიზომა გრავიტაციული ლინზირების მეშვეობით. აღსანიშნავია რომ მასის განაწილების პიკები ჩანს იქ, სადაც ყველაზე ნაკლები ატომია მოთავსებული. ეს დაკვირვება არ აიხსნება ატომებზე მოქმედი გრავიტაციის კანონის მოდიფიცირებით, არამედ აიხსნება ახალი და განსხვავებული კომპონენტის - ბნელი მატერიის შემოტანით.

3 ბნელი მატერიის მოდელი: სუსტად ურთიერთქმედი მასიური ნაწილაკი

როგორც ითქვა ბნელი მატერია არსებობს. მაშ რისგან შედგება იგი? როგორც ვიცით, სტანდარტული მოდელი არ შეიცავს მძიმე ელემენტარულ ნაწილაკებს, რომელიც სტაბილურია სამყაროს სიცოცხლის ხანგრძლივობის განმავლობაში. ამისათვის შემოყავთ ახალი ნაწილაკი, რომელიც ამ როლს შეასრულებს. ასეთ ნაწილაკს ეწოდა სუსტად ურთიერთქმედი მასიური ნაწილაკი (Weakly Interacting Massive Particle, WIMP, რომელსაც აღნიშნავენ, როგორც - χ). მართალია იგი სტაბილური ნაწილაკია, მაგრამ შეიძლება დაიბადოს წყვილად (შესაძლოა მის ანტი-ნაწილაკთან ერთად) და იგი წარმოიქმნა თერმულად ადრეულ პერიოდში, როდესაც სამყაროს ტემპერატურა საკამოდ მაღალი იყო. ეს ნაწილაკები ასევე უნდა ანიჰილირდნენ წყვილებში. თვლიან, რომ ეს პროცესები ამყარებდნენ თერმულ წონასწორობას.

ამ მოდელის გამოყენებით ბნელი მატერიის სიმკვრივის მრავალი თეორიის შექმნა შესაძლებელი.

4 ბნელი მატერიის სიგნალის წინასწარმეტყველება და მისი დაფიქსირება

ბნელი მატერიის ძებნის სტრატეგიები დღეს-დღეისობით სამი ძირითადი მიმართულებით მიმდინარეობს: 1. ძებნა კოლაიდერებზე, ბნელი მატერიის წარმოქმნის კვალის დაფიქსირება; 2. პირდაპირი ძიება, ბნელი მატერიის გაბნევის მოვლენების ძიება მიწისქვეშა ლაბორატორიებში; 3. არაპირდაპირი ძიება, გალაქტიკაში ან მზეში ბნელი მატერიის ანიჰილაციის შედეგად წარმოქმნილი პროდუქტების ძიება, როგორცაა გამა სხივები ან ნეიტრინოები.

4.1 ძიება კოლაიდერებზე

თუ სუსტად ურთიერთქმედი მასიური ნაწილაკის მასა 100 გევია, მაშინ მისი წარმოქმნა შესაძლებელი იქნება კოლაიდერზე, რომლის ნაწილაკების შეჯახების მასათა ცენტრის ენერგია აღემატება 100 გევს. მაგრამ, ყველაფერი მარტივად არაა, რადგან ბნელი მატერიის ნაწილაკი ისევე სუსტად ურთიერთქმედებს მატერიასთან, როგორც ნეიტრინო და დეტექტორს ისე განჭოლავს რომ მასში ენერგიას არ დატოვებს. მისი დაფიქსირება შესაძლებელია მასთან ერთად დაბადებული ნაწილაკების მეშვეობით, ასეთ ანალიზს უწოდებენ მონო-X ძიება-ს, რომლის მახასიათებელია: სტანტარდული მოდელის ნაწილაკთან ერთად მოვლენაში ნაკლები განივი იმპულსის არსებობა [2].

მონო - ჭავლი

თუ პროტონ-პროტონული შეჯახებებისას შესაძლებელია წარმოიქმნას ბნელი მატერიის ნაწილაკები, მაშინ შესაძლებელია ისინი წარმოიქმნას ერთ ან რამოდენიმე ჭავლთან ერთად, რომელიც საწყისი მდგომარეობის რადიაციისაგან მიიღება. ისეთი მოვლენების ძიება, რომლებიც შეიცავს მაღალი განივი იმპულსის (pT) მქონე ჭავლებს და დიდ ნაკლებ განივ ენერგიას (E_T^{miss}), დამახასიათებელი გახდა ბნელი მატერიის ძიებისათვის დიდ ადრონულ კოლაიდერზე. სახელი მონო - ჭავლი არ ნიშნავს რომ მოვლენაში მხოლოდ ერთი ჭავლი უნდა გვექონდეს, არამედ იმას, რომ მოვლენაში მხოლოდ ჭავლი შეიძლება იყოს და არა ლეპტონები.

მონო - V

მონო - ჭავლის მსგავსად ბნელი მატერიის ნაწილაკები ასევე შეიძლება წარმოიშვას ვექტორულ ბოზონთან, V-სთან ერთად, სადაც $V = \gamma, W, Z$, რომელიც გამოსხივდება კვარკისაგან საწყის მდგომარეობაში. თუ ბნელი მატერიის ნაწილაკები ყალიბურ ბოზონებთან ურთიერთქმედებს, მაშინ ეს შეიძლება იყოს დომინანტური გზა, რომლითაც შეიძლება წარმოიქმნან ისინი დიდ ადრონულ კოლაიდერზე.

მონო - ფოტონური ძიება ყველაზე მარტივი ძიებაა ბნელი მატერიისა, რომელიც მოითხოვს რომ მოვლენაში იყოს მხოლოდ მაღალი განივი იმპულსის მქონე ფოტონები და იზოლირებული ლეპტონები, ასევე დიდი ნაკლული განივი ენერგია. ფონური პროცესები საკმაოდ მცირეა და ეს ძიება შეზღუდულია მხოლოდ სტატისტიკით.

ლეპტონურად დაშლილი Z ბოზონები ასევე სუფთა სიგნალს იძლევიან. მოითხოვება დი-ლეპტონის განივი იმპულსის მიმართულება აზიმუტალურ სიბრტყეში იყოს ნაკლული განივი იმპულსის საპირისპიროდ მიმართული და იმავე სიდიდის მქონე, ასევე აღდგენილი დი-ლეპტონის მასა ახლოს უნდა იყოს Z ბოზონის მასასთან.

თუ ბნელი მატერიის ნაწილაკებთან ერთად დაბადებული W ბოზონი დაიშლება ლეპტონურად, მაშინ ნეიტრინო დაემატება ნაკლულ განივ იმპულსს და მივიღებთ ე.წ. მონო - ლეპტონურ მოვლენას.

ასევე შესაძლებელია W და Z ბოზონის ადრონულად დაშლის არხის განხილვა. ასეთი ძიების დროს ადრონული ჭავლების მასა უნდა დაემთხვეს W ან Z ბოზონის მასა, იმის მიხედვით, თუ რომელ შემთხვევას განიხილავენ.

მონო - ჰიგსი

ბნელი მატერიის ნაწილაკებს ასევე ეძებენ ჰიგსთან ერთად დაბადებისას, რომლის საბოლოო პროდუქტები შეიძლება იყოს გამა-გამა ნაწილაკები ან $b\bar{b}$ კვარკები. პირველ შემთხვევაში ფონური პროცესები საკმაოდ ცოტაა და საკმარისია ნაკლულ განივ ენერგიაზე ჩამოჭრის დადება. ეს კვლევა შეზღუდულია მხოლოდ სტატისტიკით. იმ შემთხვევაში, როდესაც საბოლოო პროდუქტებად გვაქვს $b\bar{b}$ კვარკები ფონური პროცესები საკმაოდ დიდია. მისი ძიება ხდება ერთი დიდი ჭავლით, რომელშიც გაერთიანდა ორი b-ჭავლი. ეს ძიებაც შეზღუდულია სტატისტიკით.

ბნელი მატერია + ტოპ კვარკი

თუ ბნელი მატერიის ნაწილაკების ურთიერთქმედება მძიმე კვარკებთან უფრო მაღალ ალბათურია, მაშინ დიდ ადრონულ კოლაიდერზე ყველაზე ეფექტური იქნება კვლევა, რომელიც განიხილავს მოვლენებს ტოპ - ანტიტოპ წყვილითა და დიდი ნაკლული განივი იმპულსით.

უხილავი ჰიგსის დაშლა

თუ ბნელი მატერიის ნაწილაკის მასა არის ჰიგსის ბოზონის მასის ნახევარი, მაშინ შესაძლებელია ისინი წარმოიქმნას ჰიგსის დაშლის შედეგად. ასე რომ შეიძლება ვეძებოთ ბნელი მატერია მისი დაშლის პროდუქტებში, რომელიც არ დაფიქსირდება.

ასევე შესაძლებელია pp შეჯახებისას ვექტორულ ბოზონებთან ერთად წარმოიქმნას ჰიგსის ბოზონი, რომელიც დაიშლება ბნელი მატერიის ნაწილაკებად, ეს ძიება მსგავსია მონო - V ძიების.

5 ბნელი მატერიის ურთიერთქმედება სტანდარტული მოდელის ნაწილაკებთან

იმისათვის რომ გავზომოთ და შევაფასოთ ბნელი მატერიის თვისებები, მნიშვნელოვანია აღწეროთ მისი ურთიერთქმედება სტანდარტული მოდელის ნაწილაკებთან. ამისათვის ყველაზე პოპულარული მოდელებია ეფექტური ველის თეორია (Effective Field Theory - EFT) და ე.წ. გამარტივებული მოდელები [3].

5.1 ეფექტური ველის თეორია

ეფექტური ველის თეორიის მიდგომა, აღწერს ბნელი მატერიის ურთიერთქმედება სტანდარტული მოდელის ნაწილაკებთან, არის ძალიან ეკონომიური, მომჭირნე (ნახ.2).

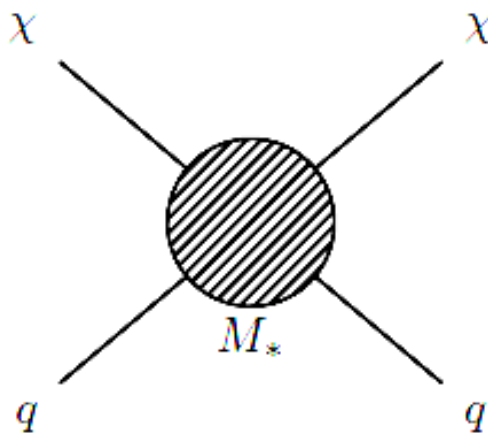
ეფექტური თეორიის მიდგომა მდგომარეობს იმაში რომ, ურთიერთქმედება ბნელ მატერიასა და სტანდარტულ მოდელის ნაწილაკებს შორის დაიყვანება უშუალო კონტაქტურ ურთიერთქმედებაზე, რომელიც აღიწერება არა-ნორმალიზებადი ოპერატორებით, მაგალითად:

$$\mathcal{L}_{\text{EFT}} = \frac{1}{M_*^2} (\bar{q}q) (\bar{\chi}\chi) .$$

ამ შემთხვევაში, ფერმიონული ბნელი მატერიის ნაწილაკი χ ურთიერთქმედებს q კვარკთან სკალარულად. ურთიერთქმედების სიმძლიერე ხასიათდება M_* -ით:

$$M_* = \frac{M_{\text{med}}}{\sqrt{g_q g_\chi}},$$

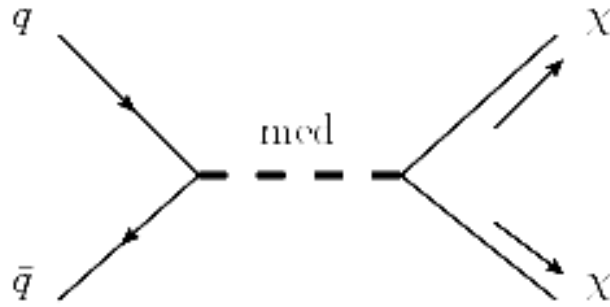
სადაც, M_{med} არის ურთიერთქმედების გადამტანის მასა და იგი უკავშირდება კვარკებსა და ბნელ მატერიას g_q და g_χ ურთიერთქმედების კონსტანტებით.



ნახ.2. ბნელი მატერიის და სტანდარტული მოდელის ნაწილაკების ურთიერთქმედების სქემატური ინტერპრეტაცია ეფექტური ველის თეორიის მიხედვით.

5.2 გამარტივებული მოდელები

გამარტივებული მოდელების [3] ლოგიკა იმაში მდგომარეობს, რომ გააფართოვოს ეფექტური ურთიერთქმედების ოპერატორი და დაუმატოს თავისუფლების ხარისხები „გადამტანი“ ნაწილაკის შემოტანით, რომელიც დააკავშირებს ბნელი მატერიის ნაწილაკებს სტანდარტული ნაწილაკის სექტორთან. ეს ნიშნავს, რომ „გამადიდებელი შუშა“ (დიდი ადრონული კოლაიდერი, ან სხვა მომავალი კოლაიდერი) იმდენად მძლავრია რომ შეუძლია დაინახოს ბუნდოვნად აღწერილი სურათს მიღმა, რომელიც ეფექტურმა თეორიამ მოგვაწოდა, თუმცა არა ყველა დეტალი (ნახ.3).



ნახ.3. გამარტივებული მოდელი: ბნელი მატერიის და სტანდარტული მოდელის ნაწილაკების ურთიერთქმედების სქემატური ინტერპრეტაცია

6 ბნელი მატერიის ძებნა ატლას ექსპერიმენტზე

6.1 CERN - ბირთვული კვლევების ევროპულ ორგანიზაცია

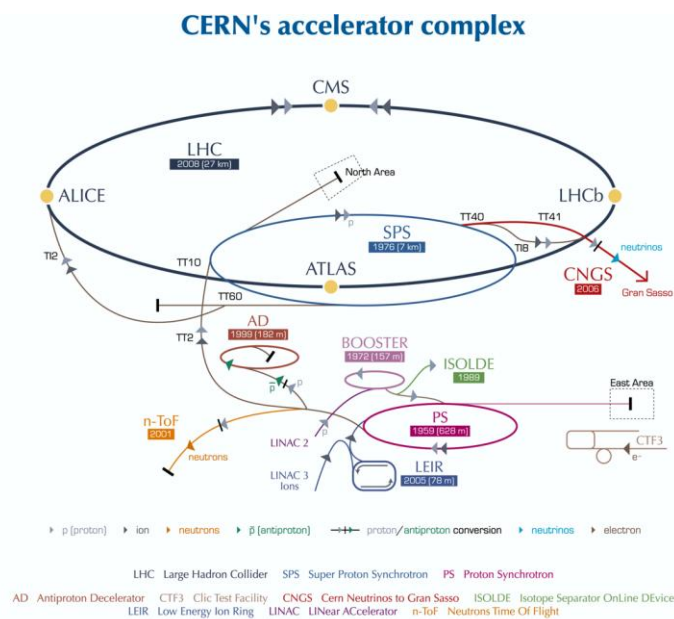
მეორე მსოფლიო ომის შემდეგ მრავალი მეცნიერი და სხვა და სხვა საერთაშორისო ორგანიზაციები გაერთიანდნენ იმისათვის რომ შექმნილიყო ბირთვული ფიზიკის მიმართულებით კვლევებისათვის ევროპული ლაბორატორია. ლაბორატორიის თავდაპირველი დასახელება ჩამოყალიბდა ფრანგული სახელით *Conseil European pour la Recherche Nucleaire* იგივე CERN-ი, რაც შემდგომში შენარჩუნდა ბირთვული კვლევების ევროპულ ორგანიზაციის აბრევიატურად, რომელიც 1954 წლის 29 სექტემბერს დაარსდა.

CERN-ი შედგება 22 მონაწილე წევრი ქვეყნისაგან, მაგრამ მეცნიერები მთელი მსოფლიოდან იღებენ მონაწილებას მის ექსპერიმენტებში.

6.2 LHC - დიდი ადრონული კოლაიდერი

დიდი ადრონული კოლაიდერი [4] არის მსოფლიოს უდიდესი და ყველაზე მძლავრი ნაწილაკების ამაჩქარებელი (ნახ.4), სადაც ორი აჩქარებული ნაწილაკების ნაკადი ეჯახება ერთმანეთს. მისი სიგრძე 27კმ-ია და გადის შვეიცარიის და საფრანგეთის საზღვარზე.

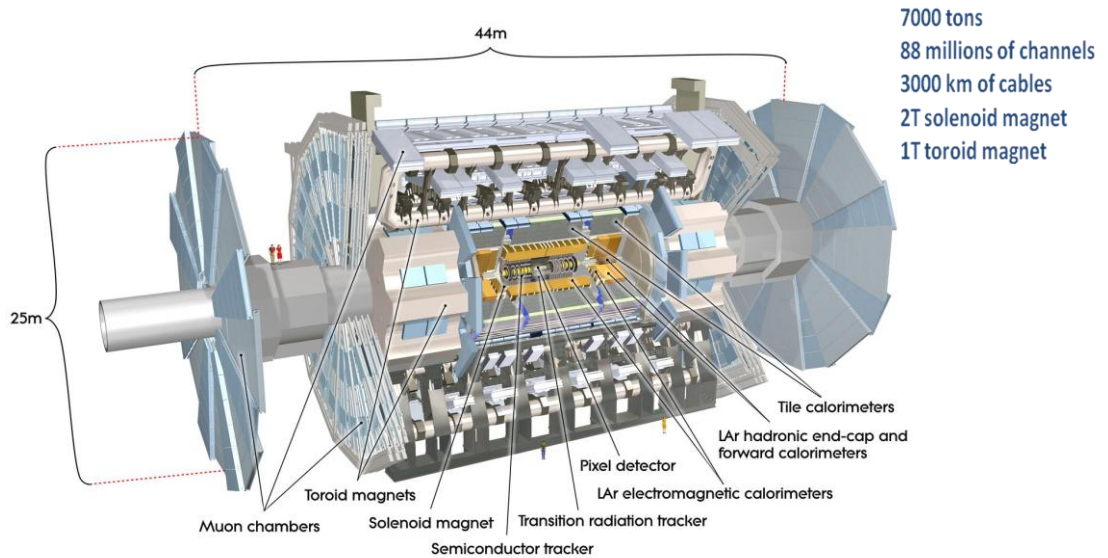
სანამ ნაწილაკების ნაკადის შეყვანა მოხდება LHC-ის 27კმ-იან რგოლში, მანამდე ისინი აჩქარებულია უკვე 450 გევ ენერგიამდე 4 შედარებით მცირე ზომის ამაჩქარებლების მიერ. შემდეგ ნაკადის აჩქარება ხდება სინათლის სიჩქარემდე, როდესაც ეს მოხდება პროტონების ნაკადები ერთმანეთს ეჯახება ექსპერიმენტების ცენტრებში. LHC-ზე ოთხი ძირითადი ექსპერიმენტი, ესენია: ATLAS, CMS, LHCb და ALICE. ამჟამად LHC-ი პროტონების ნაკადებს აჯახებს 13 ტევ მასათა ცენტრის ენერგიაზე, მისი ნათებაა 10^{34} სმ⁻² წმ⁻¹.



ნახ 4. CERN-ის ამაჩქარებლების სქემა.

6.3 ატლას ექსპერიმენტი

ბირთვული კვლევების ევროპულ ორგანიზაციაში, დიდ ადრონულ კოლაიდერზე (CERN-ში, LHC-ზე) შეიქმნა ატლას (ATLAS - A Toroidal LHC ApparatuS) ექსპერიმენტი მაღალ ენერგიაზე ახალი ფუნდამენტური აღმოჩენებისათვის. (ნახ.5). ATLAS დეტექტორი უპრეცედენტო ზომის და სირთულისაა.

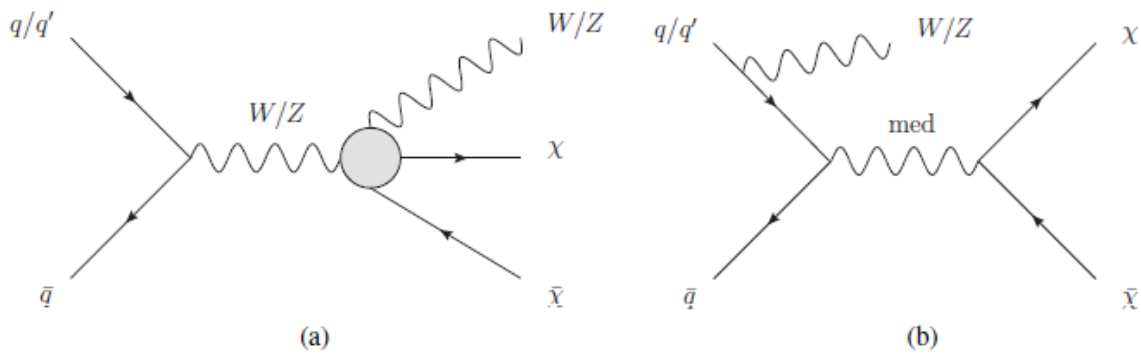


ნახ. 5 ATLAS დეტექტორი

ATLAS-ის დანადგარი სიგრძეში არის 45მ, ხოლო სიგანეში 25მ-ზე მეტი, მისი სრული წონა დაახლოებით 7000 ტონაა. იგი შედგება რამოდენიმე ქვე-დეტექტორისაგან (ნახ.5). წვეროს დეტექტორი ATLAS-ის შიდა ნაწილშია, რომელსაც გარს აკრავს სოლენოიდური მაგნიტი, კალორიმეტრები, მიუონური სისტემა, და ტოროიდალური მაგნიტი [5].

6.4 ბნელი მატერიის წარმოქმნა და აღმოჩენა ატლას ექსპერიმენტზე

ნაწილაკების კოლაიდერში ბნელი მატერიის ნაწილაკები შეიძლება წარმოიქმნან წყვილებად, რაღაც უცნობი შუალედური მდგომარეობით. საბოლოო მდგომარეობის ბნელი მატერიის ნაწილაკების დეტექტირება შეუძლებელია, მაგრამ მისი არსებობა შეიძლება დავასკვნათ სხვა, მასთან დაბადებული ნაწილაკების აღმოჩენით. მათი წარმოქმნის ორი მაგალითი მოყვალანია ნახ.6-ზე.



ნახ.6. ბნელი მატერიის წყვილების დაბადების პროცესი ვექტორულ ბოზონთან ერთად (V, იგულისხმება W ან Z) პროტონ-პროტონული შეჯახების შედეგად: (a) ეფექტური ველის თეორიის - $VV\chi\chi$ მიხედვით და (b) გამარტივებული მოდელის მიხედვით

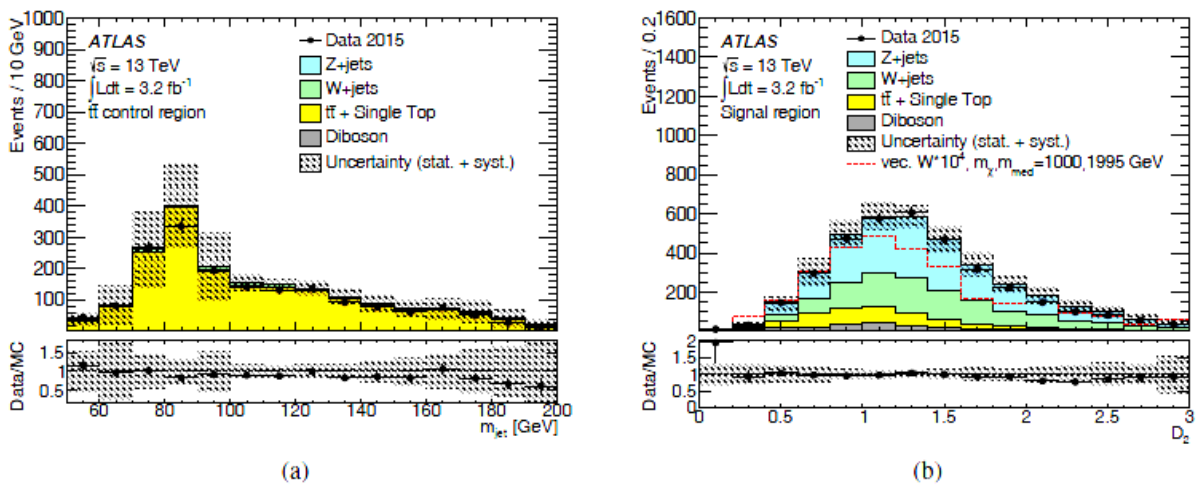
დიდი ადრონული კოლაიდერის კოლაბორაციამ ზღვრები დაადო $pp \rightarrow \chi$ ანტი- $\chi + X$, პროცესების კვეთას, სადაც X არის ან ადრონული ჭავლი, ან ფოტონი, ან W/Z ბოზონი, ან ჰიგსის ბოზონი. ბევრ შემთხვევაში ზღვრები დაედო ეფექტური თეორიის პარამეტრებს [6].

ქვემოთ განხილულია ბნელი მატერიის ნაწილაკების წარმოშობა W ან Z ბოზონთან ერთად, რომელიც იშლება ადრონულად (q, ანტი-q) და მისი რეკონსტრუქცია ხდება, როგორც ერთი მასიური ჭავლი (დიდი რადიუსის - R-ის მქონე ჭავლი) ხოლო ბნელი მატერიის მაჩვენებელი კი არის დიდი ნაკლული განივი იმპულსი. გამოყენებულია პროტონ-პროტონული ნაკადების 13 ტევი მასათა ცენტრის ენერგიაზე შეჯახებისას ატლას დეტექტორის მიერ დაგროვილი მონაცემები.

დიდი რადიუსის მქონე ჭავლის შიდა სტრუქტურის მახასიათებელია ორი სიდიდე: D_2 , რომელიც იდენტიფიცირებას უკეთებს ორი გამოკვეთილი ენერგიის კონცენტრაციის ჭავლს და m_{jet} , რომელიც ჭავლის ინვარიანტული მასაა.

ნაკლული განივი ენერგია E_T^{miss} გამოითვლება, როგორც რეკონსტრუირებული ჭავლების, ლეპტონების და სხვა ტრეკების განივი იმპულსების უარყოფითი ნიშნის მქონე ვექტორების ჯამი. მისი მსგავსი სიდიდე $E_{T,non\mu}^{miss}$ გამოითვლება ანალოგიურად, მაგრამ მიუონების გამოკლებით. მესამე სიდიდე p_T^{miss} არის ნაკლული განივი იმპულსი, რომელიც იზომება წვეროს დეტექტორის ტრეკების მეშვეობით.

დომინანტური ფონური პროცესია $Z \rightarrow \nu \text{ anti-} \nu$ წარმოქმნა ჭავლებთან ერთად. მეორე ფონური პროცესს წარმოადგენს ჭავლების წარმოქმნა W ან Z ბოზონთან ერთად, რომელიც ლეპტონურად იშლება და ლეპტონის იდენტიფიცირება ვერ ხდება, ან τ ლეპტონი იშლება ადრონულად. მესამე მნიშვნელოვანი ფონური პროცესია ტოპ კვარკული წყვილის დაბადება. ამ სამი დიდი ფონური პროცესების კინემატიკური განაწილებები შეფასებულია სიმულაციის (მოდელების) შედეგად მიღებული მოვლენებით (შემთხვევებით), მაგრამ ნორმირება ხდება საკონტროლო რეგიონებით, სადაც ბნელი მატერიის სიგნალი იმდენად მცირეა, რომ უგულებელყოფილია (ნახ. 7).



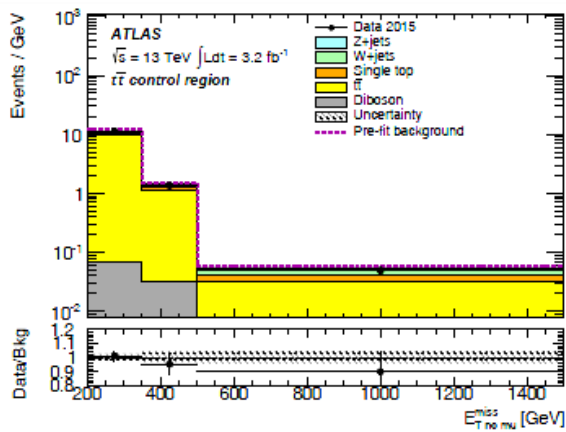
ნახ.7. (a) m_{jet} -ის განაწილება მონაცემებისათვის და მოსალოდნელი ფონური პროცესებისათვის ტოპ ანტი-ტოპ საკონტროლო რეგიონში. (b) ჭავლის სტრუქტურული მახასიათებლის D_2 -ის განაწილება მონაცემებისათვის და ფონური პროცესებისათვის, მოვლენებისათვის, რომლებიც აკმაყოფილებენ სიგნალის ყველა მოთხოვნებს, გარდა D_2 -სათვის. ასევე ნაჩვენებია გამარტივებული მოდელის ვექტორული ბოზონის გადამტანის განაწილება.

ძირითადად ორი თეორიული მოდელი გამოიყენება: შვიდ-განზომილებიანი $VV\chi\chi$ (V აღნიშნავს W ან Z ბოზონს) ეფექტური ველის თეორია [7] და ვექტორ-გადამტანი გამარტივებული მოდელი [8]. ეფექტური ველის თეორიის ურთიერთქმედების სიმძლიერე ხასიათდება მასის სკალით M_* , ხოლო გამარტივებული მოდელის ურთიერთქმედების სიმძლიერე ხასიათდება ნამრავლით - $g_{SM}g_{DM}$, სადაც g_{SM} და g_{DM} გადამტანი ნაწილაკის სტანდარტულ მოდელის ნაწილაკთან და ბნელი მატერიის ნაწილაკთან ურთიერთქმედების კონსტანტაა. ამ კვლევაში გამოყენებული შემდეგი შემთხვევები

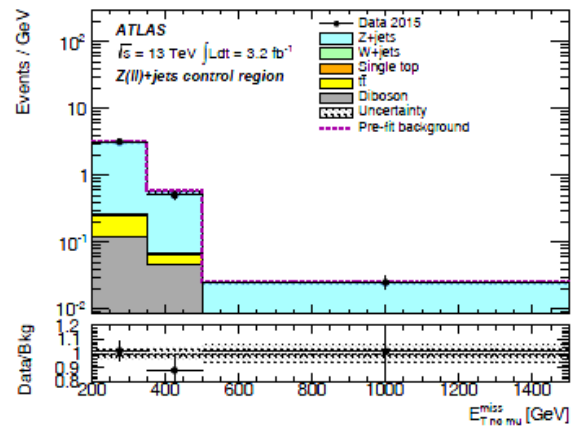
დაგენერირებულია შემდეგი მნიშვნელობებით: $M_* = 3000$ გევი, $g_{SM} = 0.25$ and $g_{DM} = 1$. ეს ნიმუშები ბნელი მატერიის ნაწილაკების მასის და გადამტანი ნაწილაკის მასის ფუნქციებია.

სისტემატიკური ცდომილების დიდი პროცენტი, 5-13% მოდის დიდი რადიურის მქონე ჭავლის მოდელირებიდან, ხოლო ვიწრო ჭავლებიდან - 1-5%. სისტემატიკის ცდომილებების სხვა წყაროებია თეორიული განუზღვრელობები (1-10%), პარტონების განაწილების ფუნქციები (10-15%) და ლეპტონების რეკონსტრუქციის და იდენტიფიკაციის ეფექტურობები (2%-მდე).

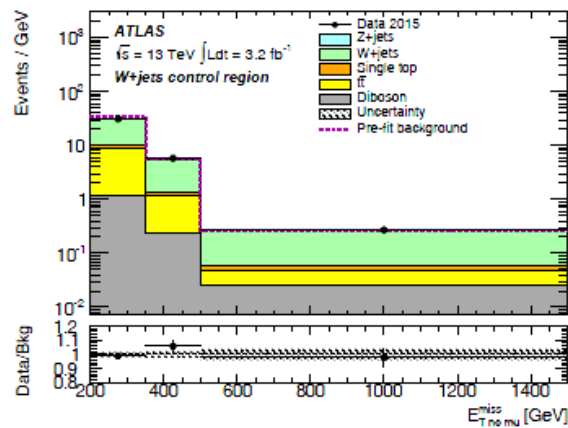
მართლმსგავსების ფიტი [9] ტარდება E_T^{miss} -ს ($E_{T,miss}$ -ს) განაწილებისთვის სიგნალის (საკონტროლო) რეგიონში და გამოიყენება იმისათვის რომ შეიზღუდოს W ბოზონის, Z ბოზონის და tt ფონების შეფასების არეები და გამოითვალოს ყველა მოდელისათვის სიგნალის ნორმირების პარამეტრი μ . დი-ბოზონის და ცალკეული ტოპის დაბადების ფონური პროცესები შეფასებულია სიმულაციით (მოდელირებით) მიღებული შემთხვევების საშუალებით, ხოლო მრავალ ჭავლიანი ფონური პროცესები უგულვებელყოფილია. მართლმსგავსების ფუნქცია განმარტებულია, როგორც ყველა ბინის შესაბამისი პუასონის განაწილებათა ფუნქციების ნამრავლი და მაქსიმიზირებულია სიგნალის და საკონტროლო ტეგიონებში.



(a)



(b)



(c)

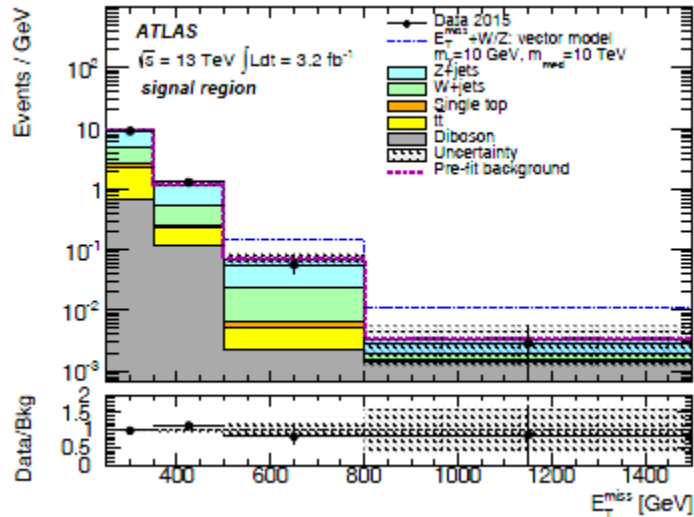
ნახ. 8. $E_{T, \text{no}\mu}^{\text{miss}}$ -ს განაწილება საკონტროლო რეგიონის მოვლენებისათვის მართლმსგავსების

მონაცემებზე ფიტირების შემდეგ მხოლოდ ფონური პროცესების ჰიპოთეზისას. (a) $t\bar{t}$

საკონტროლო რეგიონი; (b) $Z+\text{ჰავლები}$ საკონტროლო რეგიონი (c) $W+\text{ჰავლები}$

საკონტროლო რეგიონი. ფიტამდე ნაწინასწარმეტყველები ყველა ფონური პროცესების ერთობლიობა (სრული ფონი) გამოსახულია წყვეტილი ხაზით. თითოეული გრაფიკის

ქვეშ ნაჩვენებია მონაცემების ფარდობა სრულ ფონთან ფიტირებამდე.

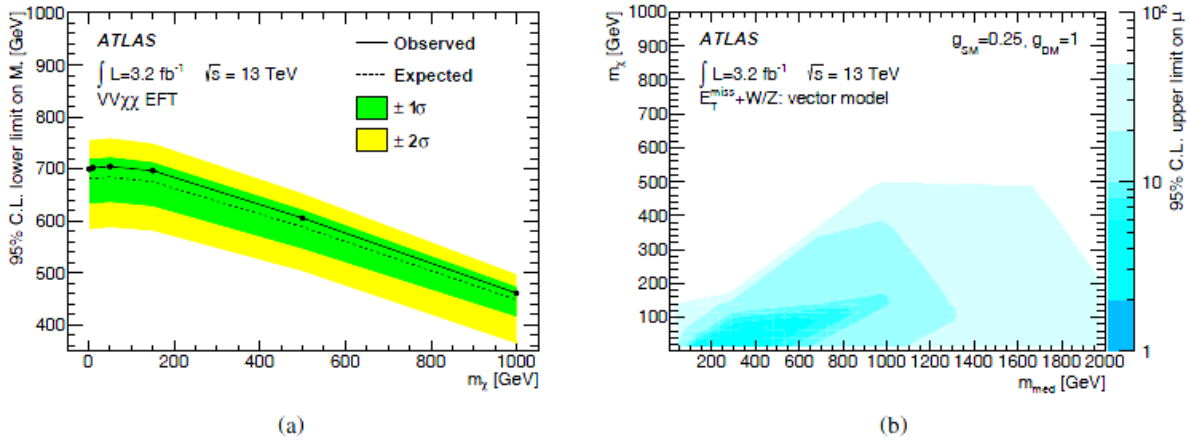


ნახ.9. E_T^{miss} -ს განაწილება სიგნალის რეგიონის მოვლენებისათვის მართლმსგავსების მონაცემებზე ფიტირების შემდეგ მხოლოდ ფონური პროცესების ჰიპოთეზისას. გრაფიკის ქვეშ ნაჩვენებია მონაცემების ფარდობა სრულ ფონთან. ასევე ნაჩვენებია გამარტივებული მოდელის ვექტორული ბოზონის გადამტანის განაწილება. ფიტამდე ნაწინასწარმეტყველები სრული ფონური პროცესები გამოსახულია წყვეტილი ხაზით. დაშტრიხული დიაპაზონი აჩვენებს სრულ განუზღვრელობას ფონურ პროცესებში.

სისტემატიკური ცდომილებების ფარგლებში მოსალოდნელი სიგნალის და ფონური პროცესების ვარიაცია აღიწერება შეშფოთების პარამეტრებით, რომელიც შემოსაზღვრულია გაუსის ალბათობის განაწილების ფუნქციით და სიგნალის და ფონური პროცესების კორელაცია გათვალისწინებულია.

ფიტირება მხოლოდ ფონური პროცესების ჰიპოთეზისას ($\mu = 0$), არ გვიჩვენებს სტანდარტული მოდელიდან გადახრას, ნახ.8 და 9-ზე გამოსახულია განაწილებები მართლმსგავსების ფიტირების შემდეგ.

μ -ს ზედა ზღვარი 95% საიმედოობის ხარისხით გამოითვლება ე.წ. CLs მეთოდით [10]. $VV\chi\chi$ ეფექტური ველის თეორიის მოდელისათვის ეს ზღვარი განიმარტება, როგორც მასის სკალის, M_* -ის, შეზღუდვა (ნახ.10(a)). ნახ.10(b) გვიჩვენებს μ -ს ზღვარს ვექტორული გადამტანისათვის გამარტივებული მოდელის თანახმად.



ნახ.10. (a) $VV\chi\chi$ ეფექტური ველის თეორიის მოდელისათვის მასის სკალის, M_* -ის ზღვარი (b) μ -ის ზღვარი ვექტორული გადამტანისათვის გამარტივებული მოდელის თანახმად. თეთრი არეები მიუთითებს ზღვარზე, რომლისთვისაც $\mu \geq 100$.

დასკვნა

ბოლო ათწლეულების მანძილზე ბევრი რამ გაკეთდა იმისათვის რომ გაეგოთ რა არის ბნელი მატერია. სუსტად ურთიერთმედი მასიური ნაწილაკების (WIMPs) ჰიპოთეზამ კარგი საწყისი შექმნა ექსპერიმენტული გამოკვლევებისათვის. თანამედროვე ექსპერიმენტები საკმარისად განვითარებული არიან ასეთი კანდიდატის აღმოსაჩნად. ატლას ექსპერიმენტმა გამოიკვლია ბნელი მატერიის წარმოქმნის ზღვრები, კონკრეტულად განხილული იყო მოვლენები, რომლებშიც W ან Z ბოზონი ადრონულად იშლება და არსებობს დიდი ნაკლული განივი იმპულსი. პროტონ-პროტონული ნაკადების 13 ტევი მასათა ცენტრის ენერგიაზე შეჯახებისას დაგროვილი მონაცემების ანალიზის თანახმად არ დაიკვირვება გადახრა სტანდარტული მოდელის წინასწარმეტყველებიდან.

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] Michael E. Peskin, Dark Matter and Particle Physics, SLAC-PUB-12493.
- [2] Felix Kahlhoefer,
Review of LHC Dark Matter Searches, arXiv:1702.02430v2.
- [3] Andrea De Simone, Thomas Jacques,
Simplified Models vs. Effective Field Theory Approaches in Dark Matter Searches,
arXiv:1603.08002v2.
- [4] Thomas Schörner-Sadenius,
The Large Hadron Collider - Background and History
- [5] ATLAS Collaboration,
The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, JINST 3 (2008) S08003.
- [6] ATLAS Collaboration,
Search for dark matter produced in association with a hadronically decaying vector boson in pp collisions at $p s = 13$ TeV with the ATLAS detector, arXiv:1608.02372v2.
- [7] L. M. Carpenter et al.,
Collider searches for dark matter in events with a Z boson and missing energy,
Phys. Rev. D 87 (2013) 074005, arXiv:1212.3352.
- [8] D. Abercrombie et al., Dark Matter Benchmark Models for Early LHC Run-2 Searches: Report of the ATLAS/CMS Dark Matter Forum, (2015), arXiv:1507.00966.
- [9] G. Cowan et al., Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics,
Eur. Phys. J. C 71 (2011) 1554, arXiv:1007.1727.
- [10] A. L. Read, Presentation of search results: The CL(s) technique, J. Phys. G 28 (2002) 2693–2704.