

ნუკლონ-ნუკლონური დრეკადი გაბნევის შესწავლა პოლარიზაციულ
ექსპერიმენტებში იულიხის COSY ამაჩქარებელზე

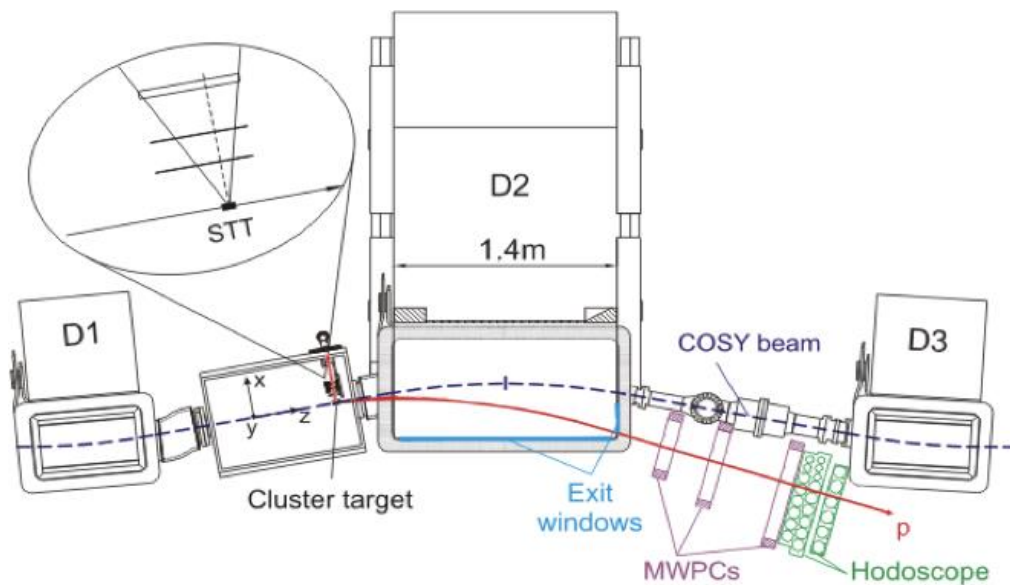
ზ.ბაღდასარიანი, ა.კაჭარავა, დ.მჭედლიშვილი, ნ.ლომიძე, გ.მაჭარაშვილი,
მ. ნიორაძე, მ. ტაბიძე, დ.ჭილაძე

ნუკლონ-ნუკლონური დრეკადი გაბნევის თემა, რომელიც ნაწილობრივ შემუშავებული და შეთავაზებული იყო თბილისის ჯგუფის მიერ, შესრულდა საერთაშორისო ANKE თანამშრომლობის ფარგლებში იულიხის COSY სინქროტრონზე ANKE მაგნიტური სპექტრომეტრის საშუალებით.

ნუკლონ-ნუკლონური (NN) ურთიერთქმედების ხასიათის დადგენა თავისთავად წარმოადგენს ფუნდამენტური კვლევის საგანს. ნებისმიერი კვლევითი ცენტრი, რომელსაც ამის შესაძლებლობას აძლევს მატერიალურ-ტექნიკური ბაზა ამაჩქარებლის ჩათვლით, ცდილობს თავისი წვლილი შეიტანოს SAID მონაცემთა მსოფლიო ბაზის [1] გამდიდრებაში. ამ მხრივ იულიხის COSY ამაჩქარებელი აღმოჩნდა უნიკალური დანადგარი: EDDA [2] კოლაბორაციის მიერ მიღებულ შედეგებმა მნიშვნელოვნად გაამდიდრა SAID ბაზა, ხოლო ANKE [3] ექსპერიმენტის მიერ ახლახანს მიღებულმა შედეგებმა მნიშვნელოვნად შეცვალეს 1 გეგ ენერჯის ზემოთ პარციალურ-ტალღური (Phase Shift Analysis - PSA) ანალიზის წინასწარმეტყველებები, რომელიც 3 გეგ ენერჯიამდე დღეისათვის წარმოადგენს მოდელზე დამოუკიდებელ ერთადერთ ანალიზს, რომელიც საშუალებას იძლევა აღვადინოთ გაბნევის ამპლიტუდები და ფაზები გაბნევის ფიქსირებულ კუთხეზე. ეს ანალიზი მოითხოვს ზუსტ გაზომვებს, რომლებიც ქმნიან სწორედ მონაცემთა მსოფლიო ბაზას (SAID).

ANKE-ზე NN-კვლევები სამი მიმართულებით მიმდინებოდა: pp დრეკადი გაბნევის ექსპერიმენტებში A_y ანალიზირების უნარისა და დიფერენციალური კვლევის გაზომვა $1.0-2.8$ გეგ ენერჯიების ინტერვალში მასათა ცენტრის სისტემაში $10^\circ < \theta_{cm} < 30^\circ$ კუთხეებისათვის. კუთხის ამ ინტერვალში სწრაფი პროტონი, რომელიც გამოდის წყალბადის სამიზნიდან, შესაძლებელია კარგად დარეგისტრირდეს ANKE მაგნიტური სპექტრომეტრის მიერ, ხოლო დიდ (90° -ის მახლობელ) კუთხეებზე გაბნეული უკუცემული პროტონი კი შესაძლებელია დამოუკიდებლად დარეგისტრირდეს სილიკონური კვალური ტელესკოპების (STT) მიერ. რაც შეეხება მეასმე მიმართულებით კვლევებს - np-კვაზიდრეკად გაბნევას სხვადასხვა ენერჯიებზე, ის რეალურად ხორციელდება დეიტრონისა და პროტონის გაბნევის ექსპერიმენტებში, როდესაც ხდება დეიტრონის გახლეჩა. რადგან დეიტრონში პროტონისა და ნეიტრონის ბმის ენერჯია სუსტია, შეიძლება ჩაითვალოს, რომ რეალურად პროტონის გაბნევა ხდება კვაზითავისუფალ ნეიტრონზე. მონაცემები დიფერენციალურ კვეთასა და ანალიზირების უნარზე მცირე კუთხეებზე ($\theta_{cm} < 30^\circ$) 1 გეგ ენერჯის ზემოთ აქ კიდევ უფრო მწირვა, ვიდრე დრეკადი გაბნევის შემთხვევაში. სპექტრომეტრზე ნეიტრონის დეტექტირება არ ხდება, მაგრამ დეიტრონის გახლეჩის რეაქციის იდენტიფიცირება შესაძლებელია 2 დეტექტირებული პროტონის საშუალებით, თუ 2 პროტონის სისტემის ნაკლები მასა ნეიტრონის მასის მახლობელი იქნება.

2013 წლის მარტ/აპრილის თვეში იულისის COSY ამაჩქარებელზე ANKE მაგნიტური სპექტრომეტრის გამოყენებით ჩატარდა pp დრეკადი გაბნევის ექსპერიმენტები პოლარიზებული პროტონული ნაკადის შემდეგ ენერგიებზე: $T_p = 0.796, 1.6, 1.8, 1.965, 2.157$ და 2.368 გეე (ექსპერიმენტი №212.0). დრეკადი პროცესის იდენტიფიკაცია ხდებოდა ერთი ან ორივე პროტონის დეტექტირებით ANKE სპექტრომეტრის წინა (FD) ან წვეროს (STT) სისტემების მიერ. ნახ.1-ზე მოყვანილია ANKE სპექტრომეტრის სქემატური სურათი.



ნახ.1 ANKE სპექტრომეტრისა და დეტექტორების სქემა [3].

სპექტრომეტრი შეიცავს სამ დიპოლურ მაგნიტს (D1,D2,D3), რომელთა მეშვეობითაც ხდება: ნაკადის გამოყვანა ამაჩქარებლის ორბიტიდან და მისი მიმართვა სპექტრომეტრის სამიზნისაკენ (D1), რეაქციის პროდუქტების გამოყოფა ნაკადის ნაწილაკებისაგან (D2) და ნაკადის დაბრუნება ამაჩქარებლის ორბიტაზე (D3). სპექტრომეტრის დეტექტირების წინა სისტემა (FD), რომელიც შედგება ტელესკოპებისაგან, სცინტილაციური მთვლელებისა და მრავალმავთულიანი პროპორციული კამერებისაგან იძლევა დადებითად და უარყოფითად დამუხტული ნაწილაკების ერთდროულად დარეგისტრირების და მათი იმპულსების გაზომვის საშუალებას. მცირე ენერგიის მქონე ნაწილაკების დეტექტირება შესაძლებელია სილიკონური კვალური დეტექტორების (STT) გამოყენებით, რომლებიც წარმოადგენენ 3 სილიკონური შრისაგან შემდგარ ტელესკოპს და განლაგებულია სამიზნის მარჯვენა და მარცხენა მხარეს სიმეტრიულად. სილიკონური შრეების სისქეები არის შესაბამისად 70, 300 და 5000 მკმ.

პროტონების დეტექტირება ხდებოდა ან FD (ჩქარი პროტონი) ან STT (ნელი პროტონი) სისტემების მიერ. რაც შეეხება კუთხურ ინტერვალებს (ლაპარაკია პოლარულ კუთხეზე), რომლებსაც ეს დეტექტორები ფარავენ, ჩატარებულ ექსპერიმენტებში ის შეადგენდა წინა დეტექტორებისათვის $10^\circ < \theta_{cm} < 30^\circ$, ხოლო წვეროს დეტექტორების შემთხვევაში $75^\circ < \theta_{lab} < 140^\circ$.

წვეროს დეტექტორში მოხვედრილი პროტონების ტრეკის აღდგენა ხდება I და II სილიკონურ შრეში ჰიტების საშუალებით, მაგრამ ამ გზით აღდგენილი პოლარული კუთხის სიზუსტე არაა დამაკმაყოფილებელი I შრეში მრავალჯერადი კულონური გაბნევის გამო. მაგრამ აქ შეიძლება გამოყენებული იქნას დრეკადი პროცესის უნიკალური თვისება - პროტონის ენერგიასა და კუთხეს შორის ცალსახა კავშირი. 30 მევაძვე პროტონები ჩერდება STT-ს III სილიკონურ შრეში და მათი იდენტიფიცირება პრაქტიკულად ცალსახადაა შესაძლებელი. რაც შეეხება უფრო ენერგიულ პროტონებს, ნეირონულ ქსელებზე დაფუძნებულმა მოდელირებამ აჩვენა, რომ 90 მევაძვე პროტონებისათვის ასევე შესაძლებელია პოლარული კუთხის კარგი სიზუსტით აღდგენა.

ექსპერიმენტებში გამოყენებული იყო ვერტიკალურად პოლარიზებული პროტონების ნაკადი. პოლარიზებული იუნური წყაროდან გამოსული წყალბადის იონები თავდაპირველად ჩქარდება წრფივ ამჩქარებელში 45 მევ ენერგიამდე და შემდეგ ის ხვდება COSY დამაგროვებელ რგოლში, სადაც ხდება მისი სასურველ ენერგიამდე აჩქარება. სისტემატიკური შეცდომების შესამცირებლად გაზომვები ტარდებოდა პოლარიზაციის ორივე მოდაზე, ნაკადის სპინით “ზემოთ” და “ქვემოთ”. ამ ორი მოდის პოლარიზაციების სხვაობა არ აღემატებოდა 1%-ს. ნაკადის პოლარიზაციის განსაზღვრისათვის ექსპერიმენტებში გამოიყენებოდა EDDA დეტექტორი. ნაკადის პოლარიზაცია ენერგიის მიხედვით მცირედით იცვლებოდა და თითოეულ ენერგიაზე მისი მნიშვნელობა მოყვანილია ქვემოთ ცხრილში.

T_p (MeV)	796	1600	1800	1965	2157	2368
p	0.554 ± 0.008	0.504 ± 0.003	-0.508 ± 0.011	-0.429 ± 0.008	-0.501 ± 0.010	0.435 ± 0.015
N	1.00	1.00	0.99	1.09	1.01	0.93

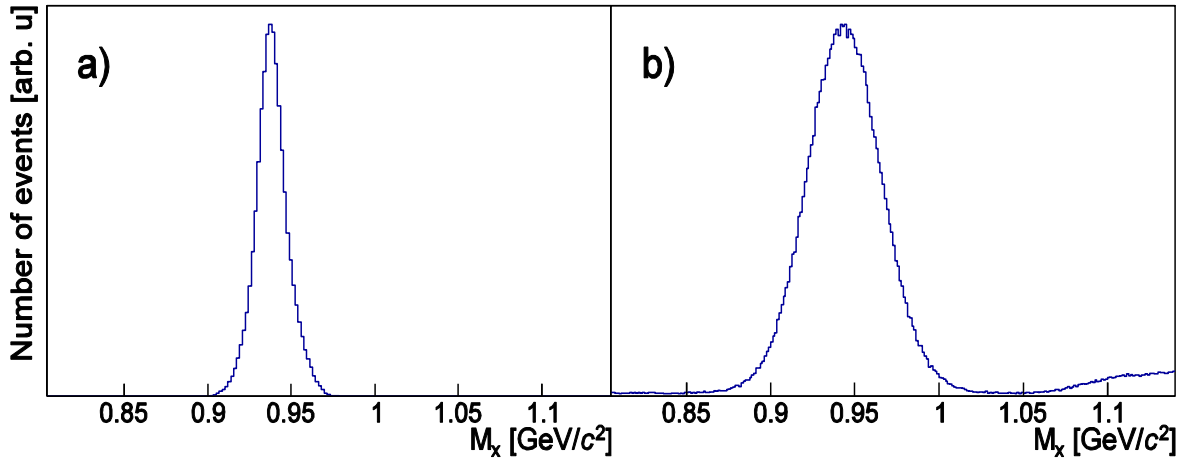
ცხრილი 1. ნაკადის პოლარიზაციის მნიშვნელობა ენერგიების მოხედვით. ნიშნის ცვლილება პოლარიზაციაში მიუთითებს, რომ ნაკადის აჩქარების დროს რეზონანსის მახლობელ ენერგიაზე მოხდა ნაკადის სპინის ამოტრიალება.

დრეკადი გაბნევის პროცესის გამოსაყოფად, როცა ერთ-ერთი პროტონის დეტექტირება ხდება დეტექტორდა წინა (FD) ან წვეროს (STT)) სისტემის მიერ, გამოიყენებოდა ე.წ ნაკლული მასის მეთოდი (ნაკლული მასა უნდა იყოს პროტონის მასასთან ახლოს). თვალსაჩინოებისათვის ნახ.2-ზე მოყვანილია პროტონის ნაკლული მასის განაწილება 1.6 გევ ენერგიაზე. როგორც ნახაზიდან ჩანს ნაკლული მასის სპექტრში პროტონის საკმაოდ სუფთა სიგნალია და ფონი პიკის ქვეშ არის მინიმალური (განსაკუთრებით წვეროს დეტექტორისათვის).

ანალიზირების უნარის განსაზღვრისათვის გამოყენებული იქნა მარჯვენა/მარცხენა ასიმეტრიის გაზომვა. რადგან წვეროს დეტექტორი ნაკადის სიმეტრულად მარჯვნივ და მარცხნივაა განლაგებული, გვაქვს რა ექსპერიმენტები ნაკადის პოლარიზაციით სპინით “ზემოთ” და სპინით “ქვემოთ” შესაძლებელია ე.წ. ორმაგი ფარდობის მეთოდის გამოყენება. ვთქვათ მარცხენა დეტექტორში მოცემული სპინის ორიენტაციისათვის დაფიქსირდა L_+ (L_+) შემთხვევა, სადაც ისარი პირობითად მიუთითებს ნაკადში სპინის ორიენტაციას.

შესაბამისად მარჯვენა დეტექტორისათვის შემთხვევათა რიცხვი იყოს R_{\uparrow} (R_{\downarrow}). გეომეტრიული მოსაზრებიდან შემოვიღოთ აღნიშვნები $R = \sqrt{R_{\uparrow}L_{\downarrow}}$ და $L = \sqrt{L_{\uparrow}R_{\downarrow}}$. მაშინ ასიმეტრია შესაძლებელია გამოითვალოს ფორმულით:

$$\varepsilon = \frac{L(\mathcal{P}) - R(\mathcal{P})}{L(\mathcal{P}) + R(\mathcal{P})} = A_y(\mathcal{P}) p < \cos \phi >, \quad (1)$$



ნახ.2 პროტონის ნაკლული მასის $M_x(pp \rightarrow pX)$ განაწილება 1.6 გეე ენერგიაზე.
მარცხენა პანელი – პროტონი დეტექტირებულია ∇ ვეროს (STT) დეტექტორში,
მარჯვენა პანელი - პროტონი დეტექტირებულია ∇ ინა (FD) დეტექტორში.

სადაც $A_y(\mathcal{P})$ არის ანალიზირების უნარი მოცემულ პოლარულ კუთხეზე, $p < \cos \phi >$ არის ნაკადის ეფექტური პოლარიზაცია, რომელიც მხედველობაში იღებს აქსეპტანსს ϕ აზიმუტალური კუთხის მიხედვით და STT შემთხვევაში $< \cos \phi > \approx 0.966$. (1) ფორმულით ასიმეტრიის გამოთვლის შემთხვევაში შესაძლებელია ე.წ. პირველი რიგის სისტემატიური ცდომილებების თავიდან აცილება, რომლებიც დაკავშირებულია დეტექტორების არასწორ ურთიერთგანლაგებასთან, ასევე ნაკადის “ზემოთ” და “ქვემოთ” პოლარიზაციების სიდიდეში განსხვავებასთან. ძირითადი ∇ ვლილი $A_y(\mathcal{P})$ -ში, რომელიც მოდის ასიმეტრიის განსაზღვრიდან, შეაქვს სხვადასხვა არასტატისტიკურობებს, მათ შორის მარჯვენა და მარცხენა ტელესკოპების ეფექტურობათა ფარდობის არასტატისტიკურობას. არასტატისტიკურობათა კორექცია გაკეთებული იქნა თითოეულ ენერგიაზე, ის 0.3% რიგისაა გარდა 1.8 გეე ენერგიისა, სადაც ეს ფაქტორი 1.3%-ს აღწევს.

ფორმულა (1)-ით სარგებლობა არაა შესაძლებელი, როცა პროტონი დეტექტირდება ∇ ინა დეტექტორების საშუალებით, რადგან იქ არაა მარჯვენა და

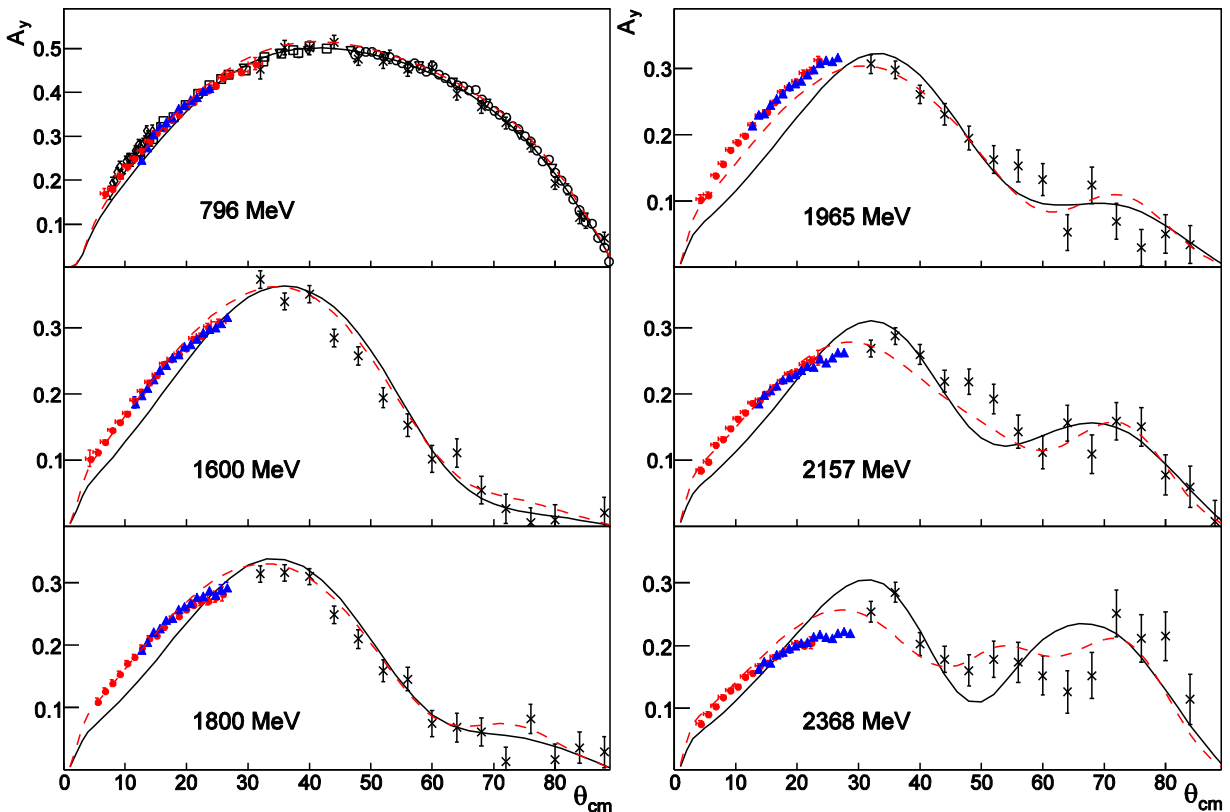
მარცხენა დეტექტორი. მაგრამ შესაძლებელია ასიმეტრიის გამოთვლა მოცემულ კუთხეზე ანათვლებში ნაკადის სპინით “ზევით” და “ქვევით”.

ძირითადი სისტემატიკური შეცდომა $A_y(\vartheta)$ -ს განსაზღვრაში შეაქვს EDDA [4] დეტექტორს და ის არის 3% რივის.

ნახ.3-ზე მოყვანილია pp დრეკადი განბნევისათვის სხვადასხვა ენერგიებზე გაზომილი A_y ანალიზირების უნარის დამოკიდებულება მასათა ცენტრის სისტემაში პოლარულ კუთხეზე. როგორც ნახაზიდან ჩანს ორი დამოუკიდებელი (FD) და (STT) დეტექტორთა სისტემის მიერ გაზომილი შედეგები კარგ თანხვედრაშია ერთმანეთთან. კერძოდ იმ კუთხურ არეში, რომელსაც ფარავს ორივე დეტექტორი

$$A_y(FD)/A_y(STT) = 1.00 \pm 0.01.$$

796 მევ ენერგიის მახლობლად არსებობს $A_y(\vartheta)$ -ის გაზომვის სხვა ექსპერიმენტული მონაცემებიც, რომლებიც ასევე კარგ თანხვედრაშია ANKE მონაცემებთან. ამ ენერგიაზე SAID SP07 წინასწარმეტყველებები, რომლებიც უწყვეტი შავი მრუდითაა დატანილი ნახაზზე, ასევე კარგად თანხვედება ექსპერიმენტულ მონაცემებს, მაგრამ უფრო მაღალ ენერგიებზე განსხვავება თვალში საცემია, განსაკუთრებით მცირე კუთხეების არეში. ამიტომ მოხდა პარციალურ-ტალღური ანალიზის თავიდან ფიტირება. ახალი ფიტის ერთ-ერთი პარამეტრის – ნორმალიზაციის ფაქტორის მნიშვნელობები მოყვანილია ცხრილში 1. ახალი SAID თეორიული გათვლები უკვე კარგ თანხვედრაშია ექსპერიმენტებთან. ვლევის შედეგები გამოქვეყნებულია [13]-ში.



ნახ.3 pp დრეკადი გაბნევის A_y ანალიზირების უნარის გაზომვის შედეგები 6 სხვადასხვა ენერგიაზე. წითელი წერტილები შეესაბამება STT, ხოლო ლურჯი წერტილები FD გაზომვებს. შავი ჯვრები შეესაბამება EDDA გამოძვებს. უწყვეტი მრუდები შეესაბამება SAID SP07 წინასწარმეტყველებებს, ხოლო წყვეტილი – გადათვლილ ამოხსნებს [1]. 789 მეგ ენერგიაზე შავი ღია სიმბოლოებით მოყვანილია LAMPF [5,6] და SATURNE [7] მონაცემები.

რაც შეეხება პროტონის პროტონზე დრეკადი გაბნევის პროცესს, წინასწარი მონაცემები დიფერენციალურ კვეთაზე უკვე არსებობდა დამცემი პროტონის ენერგიის 8 მნიშვნელობაზე. ექსპერიმენტები, რომლებშიც გამოყენებული იყო წყალბადის ჭავლური სამიზნე, ჩატარდა იულისის COSY ამაჩქარებელზე 2010 წლის ივლისში (ექსპერიმენტი №200.0) არაპოლარიზებული პროტონული ნაკადის შემდეგ ენერგიებზე: $T_p = 1.0, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6$ და 2.8 გეგ. pp დრეკადი პროცესის იდენტიფიკაცია ხდებოდა ერთი ან ორივე პროტონის დეტექტირებით ANKE სპექტრომეტრის წინა (FD) დეტექტორის მიერ (ნახ.1). ამ ექსპერიმენტების ანალიზის გამოცდილება გამოყენებული იქნა 212.0 ექსპერიმენტის მონაცემთა ანალიზის დროს.

იმისათვის, რომ გაიზომოს რაიმე ფიზიკური პროცესის კვეთა, პირველ რიგში უნდა შეფასდეს ექსპერიმენტის ე.წ. ნათება L , რომელიც პროცესის კვეთასა (σ) და შემთხვევათა რიცხვთან (R) დაკავშირებულია თანაფარდობით: $R = L \cdot \sigma$. ANKE-ზე დიფერენციალური კვეთის აბსოლუტური მნიშვნელობის განსაზღვრის პროცედურასთან დაკავშირებული საკითხები დეტალურად აღწერილია ნაშრომში [8].

ექსპერიმენტის ნათება არის ფიზიკური პროცესისაგან დამოუკიდებელი სიდიდე და სრულიად განისაზღვრება ნაკადისა (n_B) და სამიზნის (n_T) ნაწილაკთა რიცხვით: $L = n_B \cdot n_T$.

ნაკადის ინტენსივობის გაზომვა საკმაოდ რუტინული პროცედურაა და ხდება საკმაოდ ზუსტი ე.წ. BCT (Baem Curent Transformer) მოწყობილობის საშუალებით. მოცემული ექსპერიმენტის დროს ამ მოწყობილობის სიგნალების ჩაწერა ხდებოდა დეტექტორებიდან მიღებული სიგნალების ჩაწერის პარალელურად. რაც შეეხება სამიზნის სიმკვრივეს n_T , მისი შეფასება ხდებოდა ამაჩქარებლის ციკლური სიხშირის (revolution frequency) ცვლილების გაზომვის გზით, რომლის მიზეზიცაა ნაკადისა და სამიზნის ნაწილაკების ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება. შევნიშნავთ, რომ ეს მეთოდი მუშაობს მხოლოდ გაუცილებელი ნაკადისათვის და ის სრულადაა მოცემული [8]-ში, სადაც მოყვანილია ფორმულა

$$n_T = \left(\frac{1 + \gamma}{\gamma} \right) \frac{1}{\eta} \frac{1}{(dE/dx)m} \frac{T_p}{f^2} \frac{df}{dt}$$

აქ T_p და f არის ნაკადის ენერგიისა და სიხშირის საწყისი მნიშვნელობები, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ ლორენც ფაქტორია. ეს სამივე პარამეტრი შესაძლებელია საკმაოდ ზუსტად გაიზომოს COSY ამაჩქარებელზე მიმდინარე ყოველი

ექსპერიმენტისათვის. სამიზნის ატომების მასა m და დამუხრიტების უნარი dE/dx ასევე კარგი სიზუსტითაა ცნობილი NIST-მონაცემთა ბაზიდან [9]. რაც შეეხება ციკლური სიხშირის ცვლილებასა (df/dt) და ე.წ. სიხშირის სასაზღვრო η პარამეტრს (frequency-slip parameter), მათი განსაზღვრა ხდებოდა უშუალოდ მონაცემთა აღების დროს.

ნახ.4-ზე 2 ენერგიაზე მოყვანილია 212.0 ექსპერიმენტში ე.წ. “შოტკი” სპექტრები 300 წამიან ციკლებში, რომლებიც იწერებოდა ყოველ 10 წამში და რომელთა საშუალებითაც ხდებოდა ციკლური სიხშირის t დროზე დამოკიდებულების განსაზღვრა. აღმოჩნდა, რომ მაღალ და დაბალ ენერგიებზე სიხშირის ცვლილების მიმართულება სხვადასხვანაირია და ის დამოკიდებულია ამჩქარებლის მესერზე. ამის გამო, რადგან ნათება არის df/dt პროპორციული, ენერგიის გარკვეულ შუალედში ამ მეთოდის გამოყენება აზრს კარგავს მეთოდის დიდი ცდომილების გამო. სწორედ ამით აიხსნება იქ ფაქტი, რომ 1.0-1.6 გეე ენერგიის ინტერვალში დიფერენციალურ კვეთაზე მონაცემები არ გვაქვს.

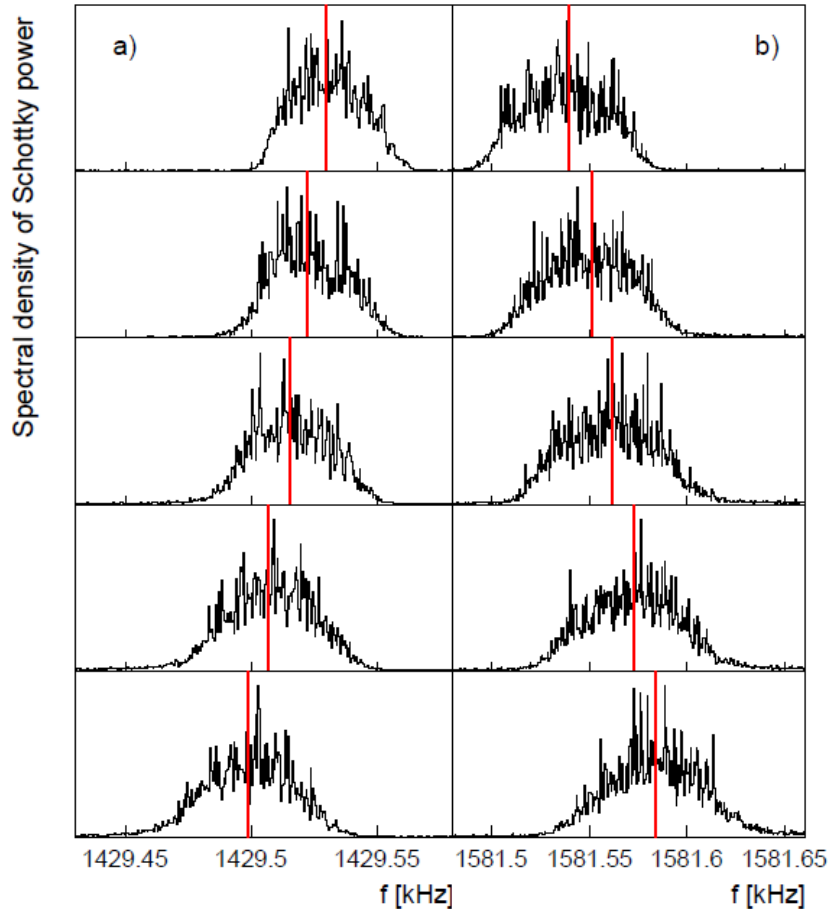
η პარამეტრის განსაზღვრა ხდებოდა შემდეგი ფორმულის გამოყენებით: $\eta = 1/\gamma^2 - \alpha$, სადაც α არის იმპულსის კომპაქტ-ფაქტორი (momentum compaction-factor) და მისი შეფასება ხდებოდა ციკლური სიხშირის ცვლილების გაზომვით COSY მიმმართველი მაგნიტების მაგნიტურ ველში. მცირე ცვლილებების დროს სიხშირისა და მაგნიტური ველის ცვლილებებს შორის კავშირი ასეთია და მისი

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \alpha \frac{\Delta B}{B_0}$$

გაზომვა ყოველი ცალკეული ენერგიისათვის ხდებოდა ცალკე ექსპოზიციებში, როცა სამიზნე გამორთული იყო.

რაც შეეხება სამიზნის სიმკვრივეს საბოლოო განსაზღვრას, ის მოხდა იმ დაშვებით, რომ სიხშირის ცვლილება გამოწვეულია არამარტო ნაკადისა და სამიზნის ურთიერთქმედებით, არამედ COSY რგოლში არსებული ნარჩენი გაზით, და აუცილებელია ამ უკანასკნელის გამოკლება. ამისათვის ჩატარებული იქნა გაზომვები სპეციალური ციკლებისათვის, როცა კლასტერული სამიზნე ჩართული იყო, მაგრამ ნაკადი მას არ კვეთდა. ეს საშუალებას იძლევა შეფასდეს ნარჩენ გაზთან ურთიერთქმედებით გამოწვეული სიხშირის ცვლილება, ამასთან გაზომვის პირობები არის ისეთივე, როგორც ნორმალური მონაცემთა აღების დროს.

ცალკე იქნა შეფასებული სისტემატიური ცდომილებები, რომლებიც მოდის FD სისტემიდან [10]. აღმოჩნდა, რომ მასათა ცენტრის სიტემაში კუთხის აღდგენაში 0.15° სისტემატიკას დიფერენციალურ კვეთაში შეაქვს 0.5% ცვლილება.



ნახ. 4 “შოტკი” სპექტრები, რომლებიც მიღებულია 300 წამიან ციკლებში 1.0 (მარცხენა) და 2.0 (მარჯვენა) გეგ ენერგიებზე. სურათები მოყვანილია 60 წამიანი ინტერვალებით ზემოდან ქვემოთ. წითელი ვერტიკალური ხაზები შეესაბამება სიხშირის საშუალო მნიშვნელობას.

მას შემდეგ, რაც ცნობილია ნათება, შესაძლებელია გაიზომოს pp დრეკადი გაბნევის დიფერენციალური კვეთა. დრეკადი გაბნევის პროცესის გამოსაყოფად, როცა ერთ-ერთი პროტონის დეტექტირება ხდება დეტექტორდა წინა სისტემის მიერ, გამოიყენებოდა ე.წ ნაკლული მასის მეთოდი (ნაკლული მასა უნდა იყოს პროტონის მასასთან ახლოს). ამ მეთოდით აგებული სპექტრი შეიცავს პროტონის გამიკვეთილ სიგნალს და ფონი არ აღემატება (1-2)%-ს, რაც კვეთაში იძლევა 0.5% ცდომილებას. I ცხრილში მოყვანილია ენერგიების მიხედვით ყველა ის ცდომილება, რომელსაც შეაქვს წვლილი დიფერენცლურ კვეთაში. როგორც ვხედავთ ჯამური ცდომილება არ აღემატება 2.5-3.5%-ს.

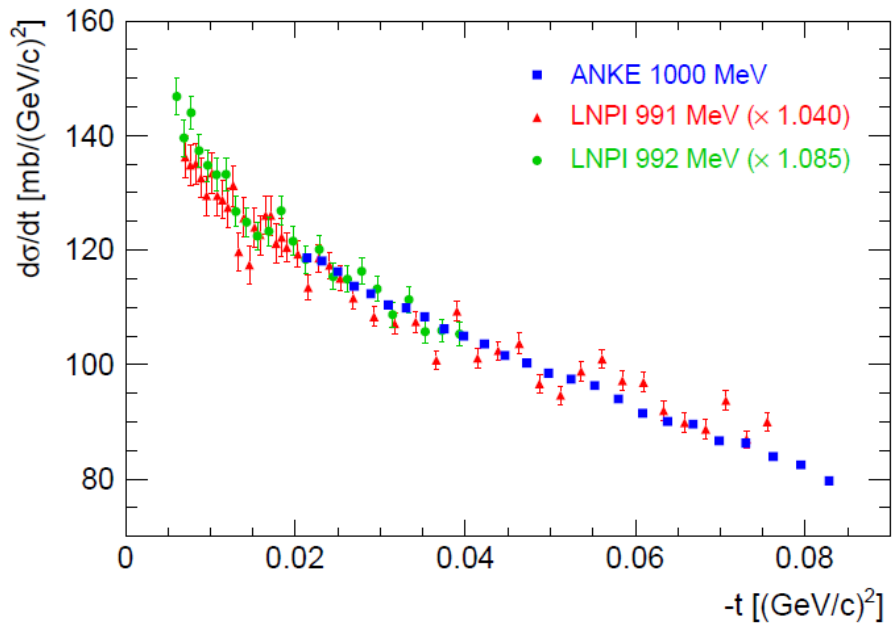
T_p	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	Total
GeV	%	%	%	%	%	%
1.0	1.6	0.7	0.7	1.5	1.5	2.8
1.6	1.2	1.9	1.4	1.5	1.5	3.4
1.8	1.3	1.6	1.6	1.5	1.5	3.4
2.0	0.8	1.9	1.8	1.5	1.5	3.5
2.2	0.3	1.0	1.0	1.5	1.5	2.6
2.4	0.4	1.5	1.6	1.5	1.5	3.1
2.6	0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	3.0
2.8	0.9	1.2	0.5	1.5	1.5	2.6

ცხრილი 1. სხვადასხვა ენერგიაზე ცლომილება დიფერენციალური კვეთის განსაზღვრაში: I სვეტი შეესაბამება η პარამეტრის წვილს, II სვეტი – ნარჩენი გაზის წვლილს, III სვეტი – სამიზნის სიმკვრივის არასტაბილურობას 300 წამის გამნავლობაში, IV სვეტი - dE/dx სიდიდის შეფასების სიზუსტეს NIST-ბაზიდან, V სვეტი – FD წვლილს. ბოლო სვეტში მოყვანილია ცლომილების ჯამური შედეგი.

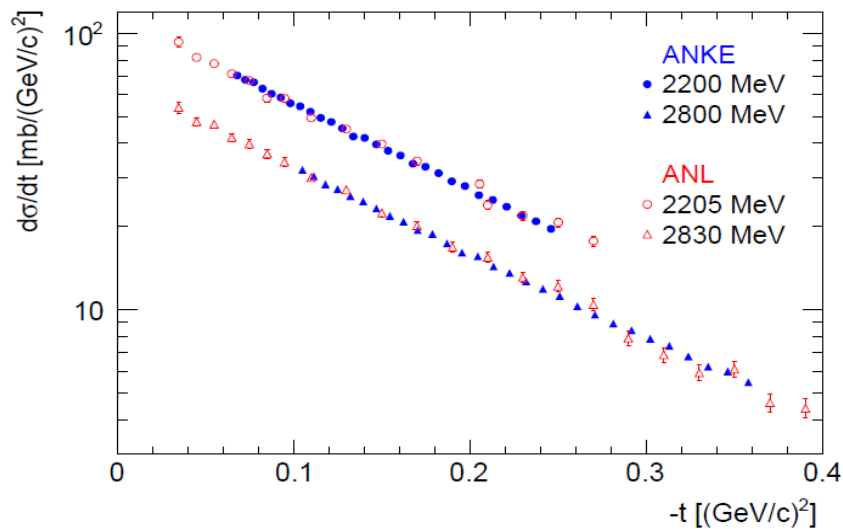
იმისათვის, რომ ANKE შედეგები შევადაროთ ამავე ენერგიებზე ჩატარებულ სხვა ექსპერიმენტების შედეგებს, აგებულ იქნა დიფერენციალური კვეთის t გადაცემულ 4-იმპულსზე დამოკიდებულება, რომელიც აპროქსიმირდება ფორმლით

$$\frac{d\sigma}{dt} = A \exp(-b|t| + C|t|^2).$$

A, B და C კოეფიციენტები ნაპოვი იქნა ემპირიულად აგებული განაწილებების მინიმიზაციით. ნახ.5 მოყვანილია 1000 მევზე ANKE ექსპერიმენტების შედეგების შედარება სკალირებულ გაჩინოს შედეგებთან [11], რომლებიც ჩატარდა 992 მევ და 991 მევ ენერგიებზე. ნახ.6 კი მოყვანილია 2.2 და 2.8 გეე-ზე ANKE ექსპერიმენტების შედეგების შედარება არაგონის ნაციონალური ლაბორატორიის [12] შედეგებთან. როგორც ვხედავთ შედეგები კარგად თანხვდება (2-3% დაბალ და 1% მაღალ ენერგიებზე) სხვა ექსპერიმენტების შედეგებს.

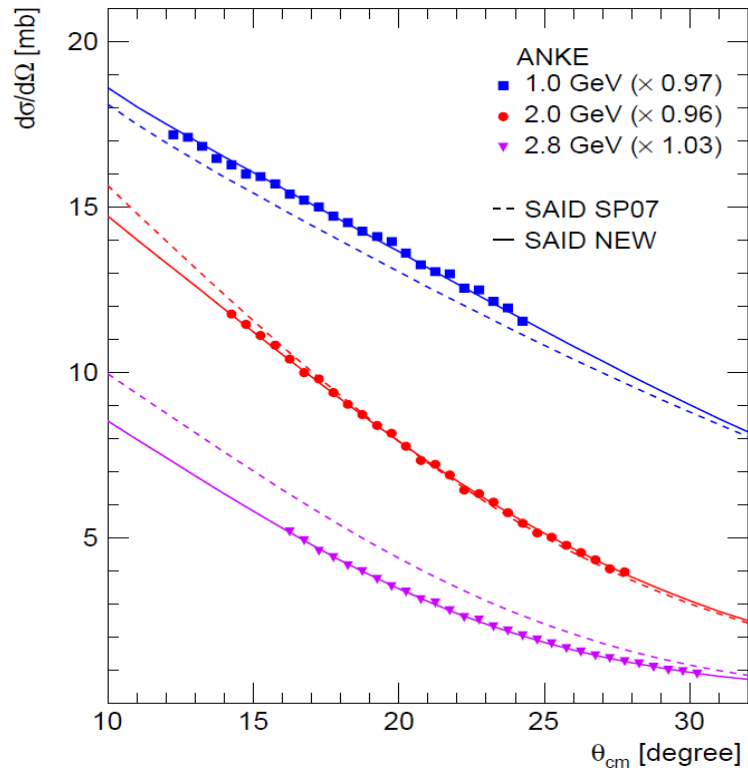


ნახ.5 ANKE-ზე გაზომილი pp დრეკადი გაბნევის დიფერენციალური კვეთა 1000 მევ ენერგიაზე. (ღურჯი კვადრატები). შესადარებლად მოყვანილია მახლობელ ენერგიებზე სკალირებული გაჩინოს ექსპერიმენტების შედეგები [11]. წითელი სამკუთხედები შეესაბამება 991 მევ ენერგიას, ხოლო მწვანე წრეები – 992 მევს. ფრჩხილებში მოცემულია სკალირების კოეფიციენტის მნიშვნელობა.



ნახ.6 ANKE-ზე გაზომილი pp დრეკადი გაბნევის დიფერენციალური კვეთა 2.2 (ღურჯი რგოლი) და 2.8 (ღურჯი სამკუთხედი) გეგ ენერგიაზე. შესადარებლად მოყვანილია მახლობელ ენერგიებზე ANL [12] შედეგები. ორივე ექსპერიმენტში ცდომილებები არის მხოლოდ სტატისტიკური.

ნახ.7-ზე მოყვანილია ANKE-ზე გაზომილი pp დრეკადი გაბნევის დიფერენციალური კვეთის მონაცემები 1.0, 2/0 და 2.8 გეე ენერგიებზე. წვეტილი მრუდები შეესაბამება SAID SP07 მონაცემებს, ხოლო უწვევტი მრუდები – ახალ, მოდოფიცირებულ პარციალურ-ტაღღურ ანალიზს, რომლის დროსაც ANKE მონაცემებიც იყო გათვალისწინებული. როგორც ვხედავთ ANKE მონაცემების გათვალისწინებით ჩატარებული მოდიფიცირებული ფიტები გაცილებით უკეთესად აღწერს ექპერიმენტულ მონაცემებს. კვლევის შედეგები გამოქვეყნებულია [14]-ში.

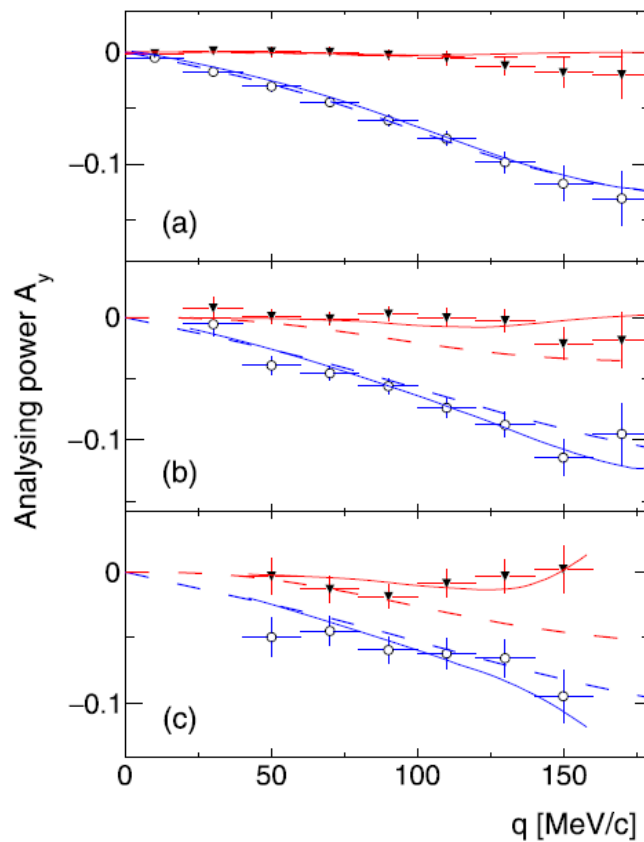


ნახ.7 pp დრეკადი გაბნევის დიფერენციალური კვეთის გაზომვის შედეგები 1.0, 2.0 და 2.8 გეე ენერგიებზე. მრუდები შეესაბამება SAID წინასწარმეტყველებებს: წვეტილი ხაზები არის SP07 [1] ამოხსნა, ხოლო უწვევტი მრუდები – ANKE მონაცემების გათვალისწინებით მიღებული მოდიფიცირებული (“ახალი”) ამოხსნა.

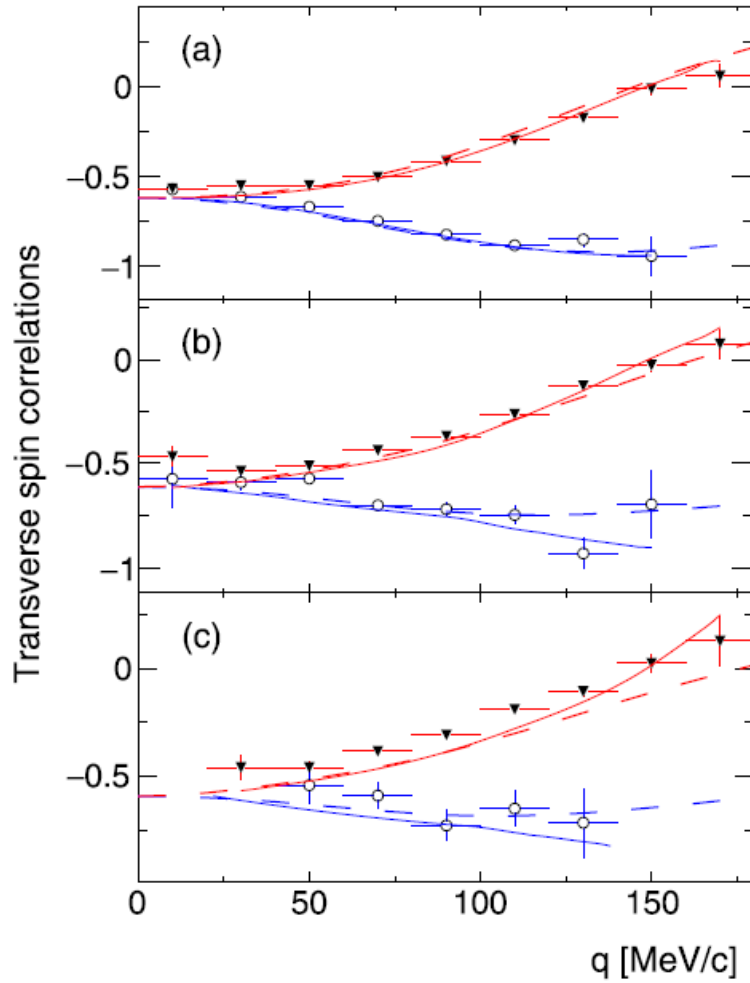
რაც შეეხება ნეიტრონის პროტონზე კვაზიდრეკადი გაბნევის შესწავლას, ექსპერიმენტები ჩატარდა რამდენიმე ეტაპად პოლარიზებული/არაპოლარიზებული პროტონის/დეიტრონის ნაკადის გამოყენებით სხვადასხვა ენერგიებზე. სამიზნეს წარმოადგენდა პოლარიზებული/არაპოლარიზებული პროტონი/დეიტრონი. ორივე ტიპის ექსპერიმენტები იქნა ჩატარებული უჯრედოვანი სამიზნის გამოყენებით, რამაც უზრუნველყო ექპერიმენტების მაღალი ნათება:

- ა) პირველ ეტაპზე ექსპერიმენტები ჩატარდა 726 მეე ენერგიის ვექტორულად პოლარიზებული დეიტრონის ნაკადის გამოყენებით, როცა უჯრედოვანი სამიზნე, შევსებული იყო პოლარიზებული წყალბადის გაზით. ნაკადის

პოლარიზაციის ხარისხი შეადგენდა 60%, ხოლო სამიზნისა 50%. $d(\text{pol})p \rightarrow \{pp\}_n$ გადამუხტვის რეაქციაში ორი ჩქარი პროტონის იდენტიფიკაცია ხებოდა ANKE სპექტრომეტრის წინა მხარის დეტექტორების სისტემის საშუალებით. ექსპერიმენტებში გაზომილ იქნა ვექტორული და ტენზორული ანალიზირების უნარები, ასევე სპინური კორელაციის კოეფიციენტები, რომელიც მოყვანილია ნახ.8-ზე და ნახ.9-ზე, შესაბამისად. როგორც ვხედავთ გაზომვები კარგ თანხვედრაშია მცირე აღზნების E_{pp} ენერგიაზე იმპულსურ მიახლოებაში შესრულებულ დათვლებთან, სადაც დომინირებს $1S^0$ მდგომარეობა, რაც მიუთითებს, რომ პარიცილურ-ტაღლური ანალიზიდან მიღებული np ამპლიტუდები კორექტულია.



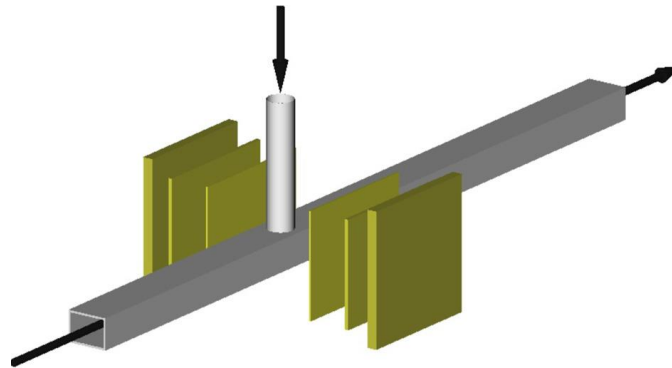
ნახ.8. დეიტრონის (ვექტორული) A_y^d (სამკუთხედები) და პროტონის A_y^p (წრეები) ანალიზირების უნარი $dp \rightarrow \{pp\}_n$ რეაქციაში 726 მევ ენერგიაზე. a) $E_{pp} < 2$ მევ, b) $4 < E_{pp} < 6$ მევ c) $8 < E_{pp} < 10$ მევ. მრუდები შეესაბამება იმპულსურ მიახლოებას ესპერიმენტის აქსეპტანსის გათვალისწინებით. წყვეტილი მრუდები შეესაბამება დათვლებს, როცა კუთხური დამოკიდებულება დიპროტონში ფარდობით იმპულსსა და გადაცემულ იმპულს შორის უზულებელყოფილია. უწყვეტი მრუდები მოდელში ამ



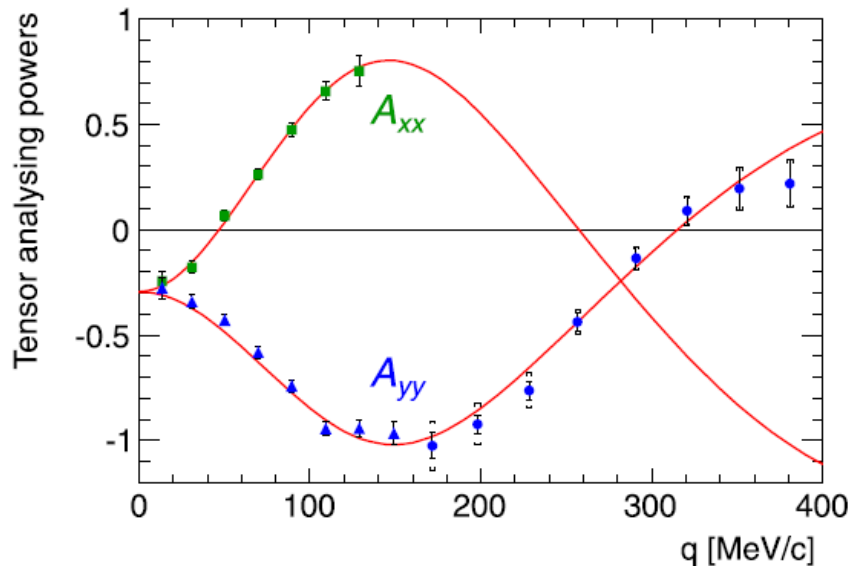
ნახ.9. სპინური კორელაციის $C_{y,y}$ (შავი სამკუთხედები) და $C_{x,x}$ (თეთრი წრეები) კოეფიციენტები $dp \rightarrow \{pp\}_n$ რეაქციაში 726 მეგ ენერგიაზე. აღნიშვნები იგივეა, რაც ნახ-8-ზე.

ბ) მეორე ეტაპზე ექსპერიმენტები ჩატარდა 600 მეგ ენერგიის არაპოლარიზებული პროტონების ნაკადის გამოყენებით, როცა უჯრედოვანი სამიზნე შეესებულა იყო პოლარიზებული დეიტრონების გაზით. დეიტრონზე გადამუხტვის რეაქციაში $pd(pol) \rightarrow n\{pp\}_s$ მიღებული ორი ნელი პროტონის დეტექტირება ხდებოდა მარჯვენა ან მარცხენა სილიკონური სტრიპული დეტექტორის (STT) საშუალებით. სამიზნის სქემატური სურათი სილიკონურ დეტექტორებთან ერთად მოცემულია ნახ10-ზე. როცა ორივე პროტონი ერთ დეტექტორში ხვდება, დეიტრონზე გადაცემული იმპულსი $q > 160$ მეგ/ც, ხოლო 2 პროტონის აღზნების

ენერგიაზე დადებული იყო პირობა $E_{pp} < 3$ მევ. სპეციალურად იქნა შესწავლილი ის შემთხვევა, როცა გაბნევა ხდებოდა სამიზნის კედლებზე, რომლებიც შეცდომების შესაძლო სისტემატიკურ წყაროს წარმოადგენენ, რისთვისაც უჯრედოვანი სამიზნე შევსებული იყო არაპოლარიზებული აზოტის გაზით. ექსპერიმენტებში გაზომილ იქნა ვექტორული A_y და ტენზორული A_{yy} ანალიზირების უნარები, რომელიც კარგ თანხვედრაში აღმოჩნდა np გაბნევის ამპლიტუდის გამოყენებით იმპულსურ მიახლოებაში მიღებულ SAID გამოთვლებთან, ასევე ადრე გაზომილი $d(\text{pol})p \rightarrow \{pp\}_s n$ რეაქციის იგივე პოლარიზაციულ მახასიათებლებთან, რომელიც მიღებული იყო 1200 მევ ენერგიის დეიტრონების ნაკადში. კვლევის შედეგები გამოქვეყნებულია [16]-ში.



ნახ.10. უჯრედოვანი სამიზნის სქემატური სურათი სილიკონურ კვალურ დეტექტორებთან (STT) ერთად (მარჯვნივ და მარცხნივ).



ნახ.11. 600 მევ/ნუკლონზე დეიტრონების ნაკადისათვის ტენზორული ანალიზირების A_{xx} (მწვანე კვადრატები) და A_{yy} (ლურჯი სამკუთხედები) უნარები $d(\text{pol})p \rightarrow \{pp\}_s n$ რეაქციაში, როცა $E_{pp} < 3$

მეგ. შედეგები მოყვანილია $q < 160$ მეგ/ც იმპულსების არეში. ლურჯი რგოლები, რომლებიც ავრძელებენ A_{yy} მონაცემებს, მოყვანილია შებრუნებული კინემატიკის რეაქციიდან $pd(pol) \rightarrow \{pp\}_n$, როცა პროტონის ენერჯია იყო 600 მეგ, ხოლო გადაცემული იმპულსი $q > 160$ მეგ/ც. მრუდები შეესაბამება დათვლებს იმპულსურ მიახლოებაში, როცა გამოყენებულია np-დრეკადი გაბნევის ამპლიტუდები (SP07 ამონახსნი).

ამდენად, შეიძლება ითქვას, რომ იულისის COSY ამჩქარებლის დანადგარზე მიმდინარე ნუკლონ-ნუკლონური გაბნევის შემსწავლელი ექსპერიმენტული პროგრამა წარმატებით იქნა დასრულებული. ჩატარებული იყო სხვადასხვა ენერჯიებზე პროტონ-პროტონული (pp) და პროტონ-ნეიტრონული (np) გაბნევის ექსპერიმენტები, როცა სამიზნეც და ნაკადიც იყო როგორც პოლარიზებული, ისე არაპოლარიზებული. არაპოლარიზებული pp დრეკადი გაბნევის ექსპერიმენტებში გაზომილ იქნა გაბნევის დიფერენციალური კვეთა, ერთმაგად პოლარიზებულ pp np დრეკადი გაბნევის ექსპერიმენტებში გაზომილ იქნა რეაქციის ანალიზირების უნარი, ხოლო ორმაგად პოლარიზებული np დრეკადი გაბნევის ექსპერიმენტებში გაზომილ იქნა სპინური კორელაციის კოეფიციენტები. მიღებული შედეგები გამოქვეყნებულია 4 მაღალიმპაქტიან ჟურნალში ([13][14][15][16]) და მოხსენებულია მრავალ საერთაშორისო კონფერენციაზე (მოხსენებათა ჩამონათვალი იხ. ქვემოთ), ხოლო როგორც მნიშვნელოვანი შედეგები, შეტანილია COSY-ექსპერიმენტულ პროგრამაზე გამოქვეყნებულ შემაჯამებელ სტატიაში [17]. ANKE გაზომვებმა მნიშვნელოვანი გავლენა იქონია მონაცემთა მსოფლიო ბაზის SAID SP07 [18] წინასწარმეტყველებებზე (იხ. ნახ.11), ცვლილება გასაკუთრებით შეეხო მაღალ ენერჯიებზე PSA ამონახსნებში $1S_0$ და $1D_2$ ტალღების წვლილს. ამან მნიშვნელოვნად გააუმჯობესა მაღალ ენერჯიებზე მოდელის ექსპერიმენტულ მონაცემებთან თანხვედრა [20].

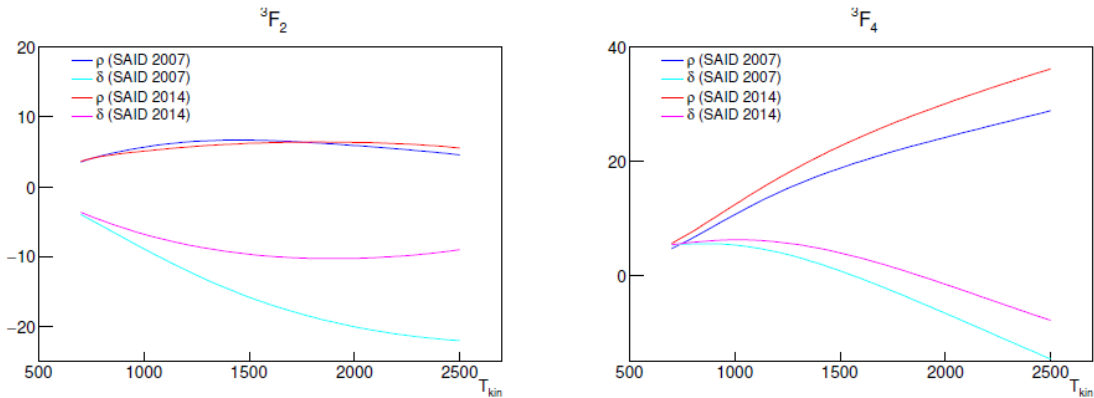


FIGURE 4.12: Phase shift parameters for 3F_2 and 3F_4 partial waves from the 2014 SAID solution, in comparison with the older solution from 2007.

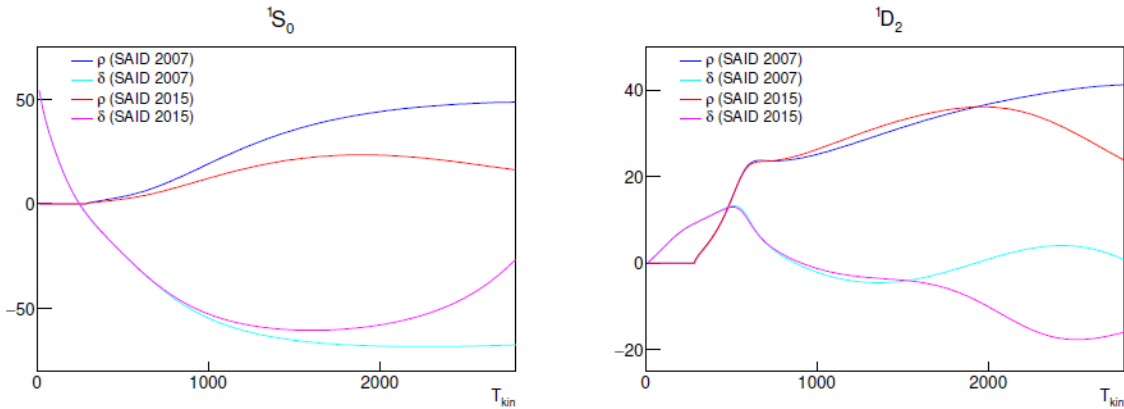


FIGURE 5.13: Phase shifts for 1S_0 and 1D_2 partial waves from the 2015 SAID solution [30], in comparison with the older solution from 2007 [5].

ნახ.11 პარციალურ-ტალღურ ანალიზში გამოყენებული სხვადასხვა ამპლიტუდების შესაბამისი მრუდები, რომლებიც გამოიყენება SAID მონაცემთა ბაზის აღსაწერად. საილისტრაციოდ მოყვანილია ახალი (2014 და 2015 წლის) ამონახსნების შედარება 2007 წლის (SP07) ამონახსნებთან. აქ δ ფაზის წანაცვლებაა, ხოლო $\eta = \cos(\rho)$, სადაც η შთანთქმის კოეფიციენტია [19].

ლიტერატურა:

- [1] R. A. Arndt et al., Phys. Rev. C 62 (2000) 034005;
R. A. Arndt, W. J. Briscoe, R. L. Workman, and I. I. Strakovsky, Interactive on-line program: <http://gwdac.phys.gwu.edu/analysis/>
- [2] D. Albers et al., Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 1652;
M. Altmeier et al., Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 1819;
F. Bauer et al., Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 142301;
D. Albers et al., Eur. Phys. J. A 22 (2004) 125;
M. Altmeier et al., Eur. Phys. J. A 23 (2005) 354.
- [3] S. Barsov et al., Nucl. Instr. Meth. A 462 (2001) 364.
- [4] E. Weise, PhD thesis, University of Bonn, 2000.
- [5] M.W.McNaughton et al., Phys. Rev. C 23 (1981) 1128.
- [6] P.R. Bevington et al., Phys. Rev. Lett. 41 (1978) 384.
- [7] C.E.Allgower et al., Nucl. Phys. A 637 (1998) 231.
- [8] H. J. Stein et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 11 (2008) 052801.
- [9] NIST-PML database, <http://www.nist.gov/pml/data/star>.
- [10] S. Dymov, ANKE internal report #12, available from <http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/anke/internal.shtml>
- [11] A. V. Dobrovolsky et al., Nucl. Phys. B 214 (1983) 1;
A. V. Dobrovolsky et al., report LNPI-1454 (1988).
- [12] I. Ambats et al., Phys. Rev. D 9 (1974) 97.

- [13] Z. Bagdasarian et al., Phys. Lett. B 739 (2014) 333.
- [14] D.Mchedlishvili et al., Phys. Lett. B 755 (2016) 92.
- [15] B. Gou et al., Phys. Lett. B 741 (2015) 305.
- [16] S. Dymov et al., Phys. Lett. B 744 (2015) 391.
- [17] C.Wilkin, arXiv:1611.07250v1 (2016).
- [18] R.A. Arndt, W.J. Briscoe, I.I. Strakovsky, R.L. Workman, Phys. Rev. C 76 (2007).
- [19] Private Communications with R. Workman and I. Strakovsky of SAID group.
- [20] R.L.Workman, W.J.Briscoe and I.I. Strakovsky, arXiv:1609.01741 (2016).

თემატიკაზე ავტორების მიერ 2013-2016 წლებში გამოქვეყნებული სტატიები:

1. "First measurements of spin correlations in the $pol\{n\}pol\{p\} \rightarrow d\pi^0$ reaction“, Phys. Lett. **B726**, 634 (2013).
2. “Excitation of the Delta (1232) isobar in deuteron charge exchange on hydrogen at 1.6, 1.8, and 2.3 GeV“, Phys. Lett. **B726**, 145 (2013).
3. Measurement of spin observables in the quasi-free $np \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ reaction at 353 MeV S.Dymov et al., Phys. Rev. **C88**, 014001 (2013).
4. " Measurement of the analysing power in pp elastic scattering at small angles" , Phys. Lett. **B739**, 152 (2014).
5. "Analysing powers and spin correlations in deuteron-proton charge exchange at 726 MeV", Phys. Lett. **B744**, 391 (2015) .
6. "Study of the $pd(pol) \rightarrow n\{pp\}$ charge-exchange reaction using a polarised deuterium target" , Phys. Lett. **B741**, 305 (2015).
7. "Measurement of the absolute differential cross section of pp elastic scattering at small angles", Phys.Lett. **B755**, 92 (2016).

თემატიკაზე ავტორების მიერ 2014-2016 წლებში გაკეთებული მოხსენებები საერთაშორისო კონფერენციებზე:

1. „Measurement of nucleon-nucleon elastic scattering at small angles up to maximum COSY energies“, M.Tabidze, CANU/FFE/CBAC Meeting, December 16, Bad Honnef, Germany (2014);
2. “Ay Measurement in pp elastic scattering at small angles“, G.Macharashvili, Proceedings of the 21th International Symposium on Spin Physics; SPIN2014, October 20 - 24, Beijing, China (2014)
3. “Measurement of the analysing power in proton-proton elastic scattering at small angles“, Z.Bagdasarian, Proceedings of the 53-rd International Winter Meeting on Nuclear Physics, BORMIO2015, January 26-30, Bormio, Italy (2015);
4. “Nucleon-Nucleon scattering at small angles measured at ANKE-COSY“, Z.Bagdasarian, Proceedings of the 21st International Conference on Few-Body Problems in Physics; FB21, May 18 - 22, Chicago, USA (2015);

5. *“Contribution of HEPI TSU group to NN scattering experiments” D. Mchedlishvili, HEPI-35, November 27, Tbilisi, Georgia (2015).*