

**ПОЛЯРИМЕТРИ ПОЛЯРИЗОВАНИХ ПУЧКІВ У ДІАПАЗОНІ
ЕНЕРГІЇ 0,07 - 1 ГеВ****М. І. Заїка, М. І. Магаль, В. М. Заїка***Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Проаналізовано можливість створення широкодіапазонної за енергією та атомною вагою поляриметрії різних іонів, що є необхідним у зв'язку з наявністю деполаризуючих резонансів при прискоренні в накопичувальних прискорюючих кільцях (НПК), у тому числі кільці проекту НПК Інституту ядерних досліджень НАН України (ІЯД), і деполаризації в транспортуючих лініях прискорених іонів. Наведено основні вимоги до такого поляриметра: універсальність для різних енергій і мас іонів, максимальна ефективність, найбільш придатні для цього ядра та реакції на них, наявні в світі дані з аналізуючої здатності. Сформульовано основні вимоги до поляриметра та визначено з кінематичних розрахунків область кутів реєстрації вторинних частинок і методи заглушення фонових відліків. Наведено схему поляриметра, здатного працювати як при прискоренні поляризованих іонів у НПК, так і енергії поляризованих частинок, при якій проводиться експеримент на циркулюючому в кільці пучку. Схема включає в себе мішенний вузол, камеру поляриметра та детектуючу систему.

1. Поляриметрія поляризованих пучків до 1 ГеВ

На основі робіт, виконаних раніше в ІЯД, по створенню техніки для поляризаційних експериментів, розроблених методів розрахунків і відповідних програм з урахуванням світового досвіду та характеристик фізичних проектів НПК ІЯД було вивчено динаміку спінів широкого класу поляризованих іонів з $A = 1 - 40$ у вказаних кільцевих прискорювачах, приймаючи до уваги резонансну деполаризацію та деполаризацію в електромагнітних полях ліній транспортування пучків.

Вивчення фізичних і технічних передумов створення унікального за можливостями для поляризаційних досліджень комплексу показало, що в існуючих проектах будуть реалізовуватися резонансні деполаризуючі умови (в останньому варіанті НПК ІЯД біля 70 резонансів для іонів з $A = 1 - 40$), які не дозволять здійснити проектні параметри при прискоренні поляризованих іонів. Тому було запропоновано нові технічні пристрої для подолання деполаризуючих резонансів, що повинні бути включені в структуру НПК типу "сибірська змійка". Основою роботи цих пристроїв є спіновий ротатор і система діагностики поляризованого пучка під час прискорення й проведення експериментів з поляризованими частинками до енергій 900 МеВ по протонам і 300 А МеВ для іонів з $Z/A = 0,5$.

2. Основні вимоги по поляриметрії

Задача поляриметрії пучка іонів з енергією більше 10 МеВ завжди була складною внаслідок малої ефективності вимірювань через невеликі перерізи реакцій і малі допустимі товщини мішеней поляриметра, що використовуються для цих цілей. Внаслідок специфіки динаміки спінів в електромагнітних полях ліній транспортування й прискорювачів, що приводить до деполаризуючих ефектів, у тому числі резонансних у циклічних прискорювачах, поляриметрія при прискоренні поляризованих іонів у складному прискорювальному комплексі є досить важкою й вирішується на кожному прискорювачі (комплексі), виходячи з енергії, типів іонів і необхідних для контролю компонентів поляризації, число й тип яких визначаються величиною спінів іонів. У даній роботі виходили з того, що рішення задачі діагностики поляризації повинно задовольняти всім нижченаведеним вимогам при мінімальному об'ємі необхідного обладнання та витрат.

При всебічній поляриметрії іонних пучків різного типу й енергії в НПК необхідно задовольнити такі вимоги:

1) проведення діагностики пучка по поляризації від інжектваної енергії до максимально можливої (десятки МеВ - ГеВ), вимірювання на циркулюючому в накопичувачі пучку, у тому числі при прискоренні;

2) забезпечення поляриметрії від протонів до іонів з $A = 40$ і визначення всіх можливих компонентів поляризації для кожного із типів поляризованих іонів з набором спінів від $1/2$ до $3/2$;

3) типові вимоги до поляриметра: висока ефективність, велика аналізуюча здатність, тобто високе $A^2(\theta)\sigma$ при дотриманні вимог по спектрометрії (достатня енергетична роздільна здатність і виділення продуктів аналізуючої реакції на фоні сигналів від супутніх процесів і радіаційного фону);

4) технічна простота, універсальність, зручність у роботі, надійність, максимально можлива точність вимірювань.

Перша вимога передбачає використання тільки частинок прискорювача та відповідної ідентифікації по енергії, тобто, якщо вимірювання проводяться у процесі прискорення, то відповідні сигнали в системі поляриметра повинні бути ідентифіковані за типом і енергією частинок та аналізуючою здатністю ядерного процесу на мішені поляриметра. Задоволення цієї вимоги дозволить не тільки проводити контроль поляризації пучка у фазі проведення експерименту при кінцевій енергії на внутрішній мішені, але й стежити за динамікою спінів і роботою технічного обладнання у подоланні деполаризуючих резонансів на всій стадії прискорення від енергії інжекції у накопичувальне кільце до максимальної енергії прискорення.

Широкий діапазон поляризованих іонів по масі (1 - 40) і специфіка взаємодії кожного типу іонів з ядрами (відмінність диференціальних перерізів, кутової та енергетичної залежності аналізуючої здатності) вимагають пошуку найбільш простих і економічних рішень, неможливих без всебічного аналізу.

При розробці ми керувалися загальними положеннями по поляриметрії пучків іонів середніх енергій, сформульованих на основі накопиченого у світі досвіду [1]. Ефективність системи поляриметра η у першу чергу залежить від товщини мішені, тобто кількості ядер N , та аналізуючої здатності $A(\theta)$ [1]

$$\eta = \overline{A^2(\theta)\alpha(\theta)} = \overline{A^2(\theta)N\sigma(\theta)}d\omega, \quad (1)$$

а можливий тілесний кут спостереження $d\omega$ визначається величиною кутового періоду $\Delta\theta$ осциляцій $\sigma(\theta)$ і $A(\theta)$, яка добре відбивається і при високих енергіях дифракційною моделлю Ситенка - Глаубера та виражається через

$$\Delta\theta \cong \frac{\pi}{kR} \approx \frac{10.1}{A_p A_t^{1/3} \sqrt{E / A_p}}. \quad (2)$$

З виразу (2) видно, що $\Delta\theta$ найбільше для легких іонів A_p , легких ядер A_t мішені й зменшується із зростанням енергії частинок E/A_p . Можлива кількість ядер у мішені N обернено пропорційна іонізаційним втратам dE/dx , тобто величині $E/Z \cdot \rho$ (див. [1]), де Z - заряд частинки, а ρ - густина речовини. Оскільки кількість атомів у мішенях на см^2 , що мають однакові гальмівні здатності, пропорційна $1/Z \cdot \rho$, для мішеней у твердому стані вона більша для легких елементів, що мають менше значення ρ .

З точки зору енергетичної роздільної здатності в системі поляриметра краще використовувати ядра мішені і ядра-продукти реакцій, які не мають зв'язаних станів або їх перший збуджений стан лежить досить високо. Тому зупинилися на ядрах ^1H , ^2H , ^3H , $^4\text{He}(E^* \cong 20)$ і $^{12}\text{C}(E_1^* = 4,43)$ та ядерних процесах, які мають великий переріз пружного розсіяння та реакцій під малими кутами.

3. Аналізуючі здатності

Для протонів вказані ядра, як правило, мають високу аналізуючу здатність в області проміжних енергій (0,1 - 1 GeV, рис. 1 - 3), дані для яких взято із [1] з додаванням нових експериментальних результатів для вуглецю [2] (див. рис. 3) і водню [3] (див. рис. 1).

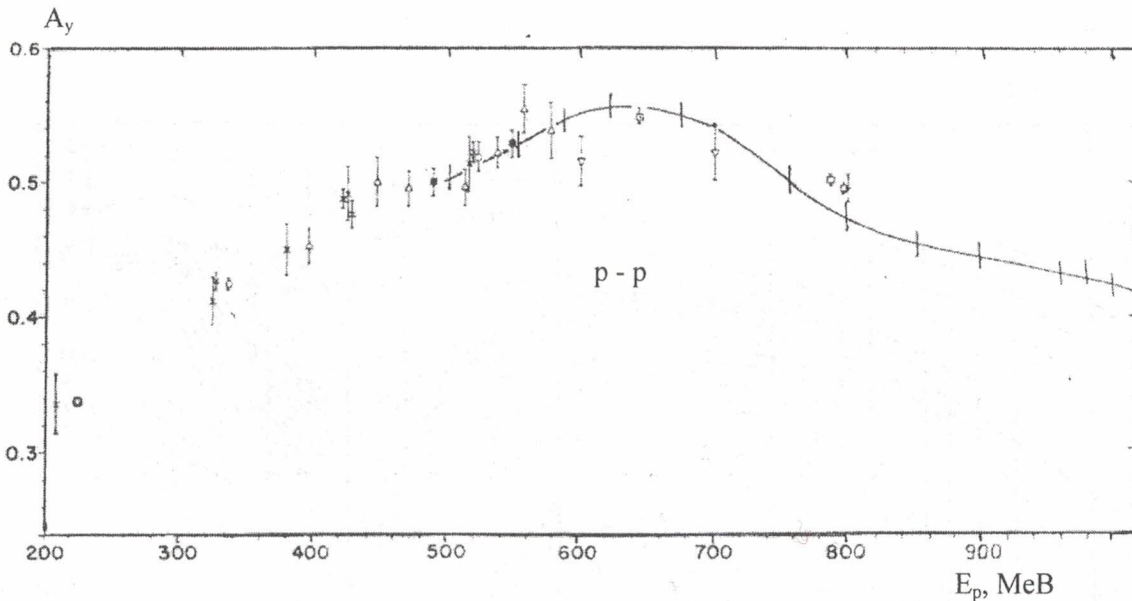


Рис. 1. Енергетична залежність аналізуючої здатності $p - p$ розсіяння в області проміжних енергій $\theta_L = 17^\circ$ (точки) і $\theta_L = 68^\circ$ (лінія). Дані, відображені лінією, отримано з енергетичним інтервалом 4 - 17 MeV і похибками $\leq 0,01$ (вертикальні відрізки на кривій).

З рисунків, які відображають експериментальні результати, видно, що необхідний діапазон енергій для протонів від 0,07 GeV для інжектіваних в НПК енергій до кінцевої енергії 0,9 GeV з успіхом може бути перекритий поляриметром з мішенями ^1H , ^2H , ^{12}C .

Для інших поляризованих іонів, що розглядаються для прискорюючого комплексу ІЯД (див. рис. 3), дані з аналізуючої здатності належать або до середніх енергій (d , ^6Li), або взагалі відсутні в діапазоні енергій $E \cong (30 - 300)A$ MeV, що нас цікавить. Тому подальший розгляд ґрунтується на двох положеннях: 1) при певних спінових структурах реакцій через закони збереження парності та кутового моменту аналізуюча здатність є константою або існують строгі співвідношення між аналізуючою здатністю для падаючої частинки та ядра-мішені незалежно від механізму реакції й енергії частинок; 2) подібність кутової поведінки векторної аналізуючої здатності за однієї й тієї ж енергії в системі центра мас для поляризованих частинок або поляризованих ядер мішені.

Перше з цих положень є строгим, але воно може бути застосоване тільки до обмеженого класу реакцій із заданою спіноюю структурою, в якій у більшості випадків для реакції типу $a + A \rightarrow b + B$ вихідний канал характеризується спіноюю структурою $0 + 0$ (подробіці див. в [1]). Воно не може бути застосоване до пружного розсіяння, тобто процесу з великим поперечним перерізом. Друге не є строгим, оскільки у взаємодії двох ядерних об'єктів зі спіновими вимогами інваріантності допускається в потенціалі взаємодія багатьох спінзалежних членів, у тому числі тензорних. Це приводить до залежності диференціального перерізу з поляризованими частинками від багатьох компонентів поляризації падаючого іона та (або) ядра мішені. Наприклад, для спінової структури $1/2 + 1 \rightarrow 1/2 + 1$ диференціальний переріз $\sigma_{jk}(\theta)$ виражається через переріз для неполяризованих частинок $\sigma_0(\theta)$ таким чином [4, 5]:

$$\sigma_{jk}(\theta) = \sigma_0(\theta)[1 + p_j A_{jo} + 3/2 p_k A_{ok} + 1/2 p_{kk} A_{kk} + 3/2 p_j p_k A_{jk} + p_j p_{kk} A_{j,kk}], \quad (3)$$

де $j, k = x, y, z$, а $p_j, p_k(A_{jo}, A_{ok})$ - векторна поляризація (аналізуюча здатність) для падаючої частинки і мішені; $p_{kk}(A_{kk})$ - тензорна поляризація (тензорна аналізуюча здатність); $A_{j,k}$ і $A_{j,kk}$ - вектор-векторні та вектор-тензорні спінові кореляційні коефіцієнти відповідно.

θ с.ц.і., град

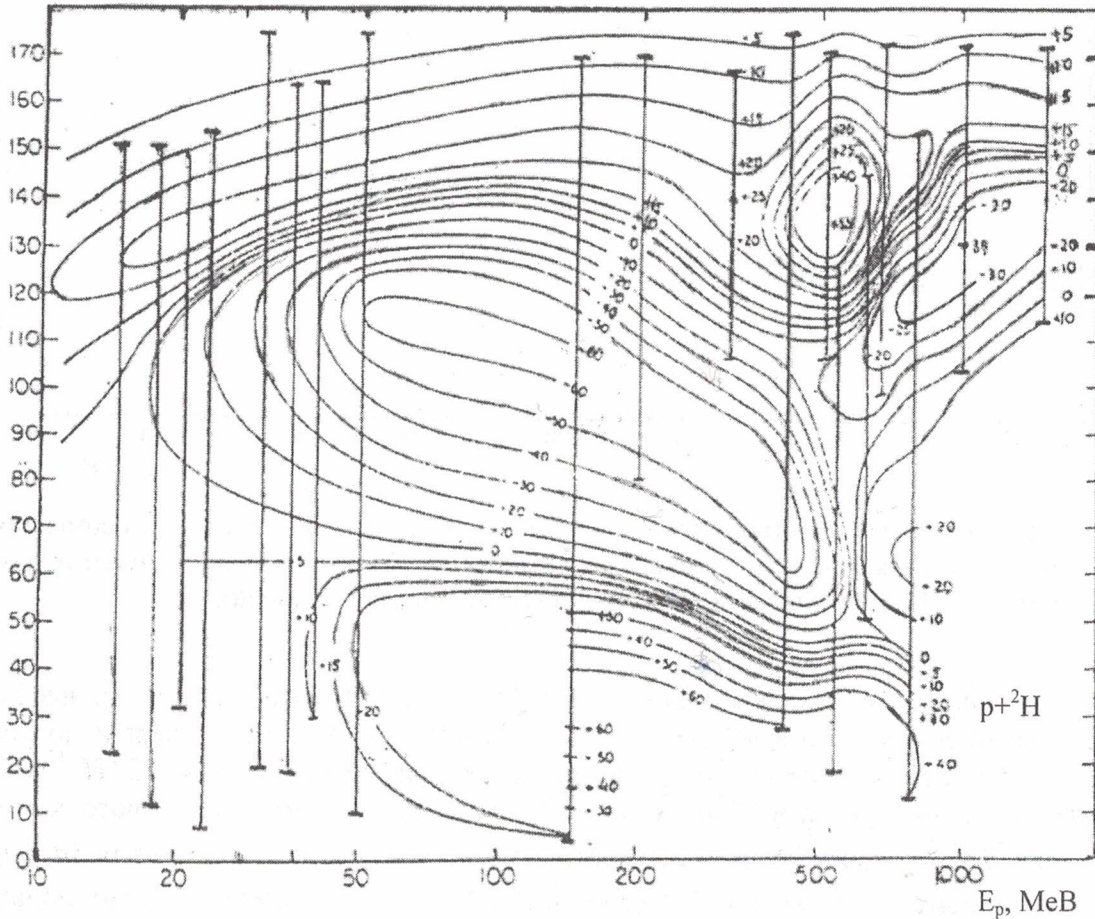


Рис. 2. Контурна карта аналізуючої здатності $p - d$ розсіяння.

З виразу (3) видно, що векторні аналізуючі здатності такої реакції (аналог за спіноювою структурою $p - d$ розсіяння) у загальному випадку не мають простого зв'язку. Однак при середніх енергіях експериментальні дослідження векторної аналізуючої здатності пружного розсіяння дейтронів та їх аналіз по оптичній моделі показали (див., наприклад, [6]), що вони можуть бути описані з включенням тільки спін-орбітального члена в потенціал взаємодії. У цьому випадку подібність кутових залежностей векторних аналізуючих здатностей, що експериментально спостерігається при середніх енергіях при поляризованому одному або іншому ядрі вхідного каналу $p + d, d + ^3He$, стає зрозумілою [7]. Виходячи із більш повних даних по векторній аналізуючій здатності $p - A$ і $d - A$ розсіяння, проведено аналіз можливої поляриметрії поляризованих іонів з $A \geq 2$ при їх пружному розсіянні на мішенях водню і дейтерію. При цьому враховувалося, що в більшості випадків досить даних тільки в області середніх і початку області проміжних енергій, оскільки для водневої мішені й іона з максимальною можливою енергією $300 A_p$ MeV енергія в системі центра мас складає

$$E_{c.m.} = \frac{A_t}{(A_p + A_t)} E_{lab} = \frac{1}{(A_p / A_t + 1)} 300 A_p \leq 300 A_p. \quad (4)$$

Результати аналізу разом з даними для протонів наведено в таблиці для іонів до ${}^7\text{Li}$. Для більш важких поляризованих іонів з $A = 10 - 40$, прискорення яких розглядалося в [5] для НПК ІЯД, повні експериментальні дані з аналізуючої здатності практично відсутні.

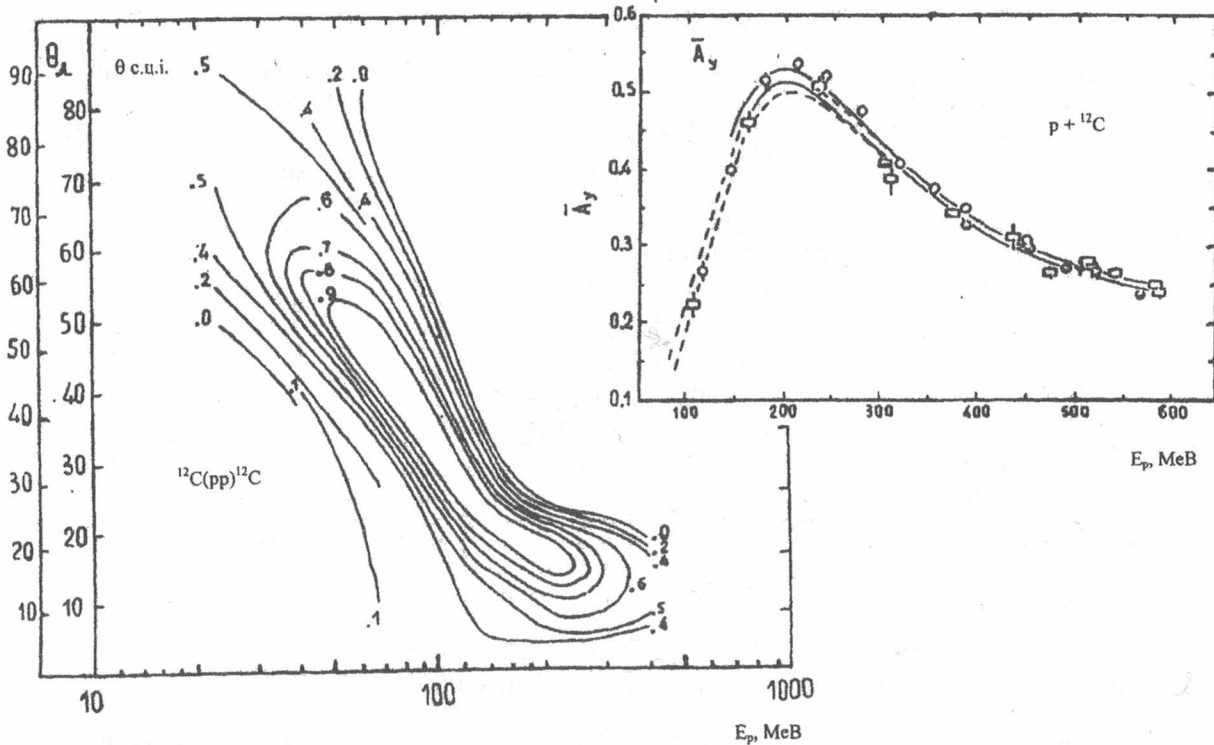


Рис. 3. Контурна карта аналізуючої здатності пружного розсіяння протонів на вуглеці в області кутів першого максимуму. На вставці – енергетична залежність усередненої по кутах ($\theta_n = 5 - 20^\circ$) аналізуючої здатності пружного розсіяння на вуглеці при товщині мішеней 3 - 7 см.

4. Мішень поляриметра

Крім необхідності використання різних мішеней поляриметр на циркулюючому пучку повинен мати ряд особливостей, що відрізняють його від звичайного, працюючого на виведеному пучку, а саме:

- 1) поляриметр повинен працювати в процесі прискорення, тобто у великому енергетичному діапазоні не порушуючи процес прискорення;
- 2) при досягненні максимальної енергії пучка поляриметр повинен працювати, не порушуючи хід експерименту й не впливаючи на траєкторії циркулюючих частинок. Можливі рішення: тонка мішень ($\sim 10^{14} \cdot \text{см}^{-2}$), товста мішень, що повільно вводиться для максимальної енергії;
- 3) поляриметр має мати кільцеподібну товсту мішень з отвором для циркулюючого пучка.

У першому випадку це газоподібна мішень (газовий струмінь з диференціальною відкачкою), вона дуже складна через жорсткі вакуумні умови в прискорювачі. У другому випадку мішень застосовна при максимальній енергії після закінчення досить малого періоду прискорення (порядку мс) і тривалого періоду експерименту (десятки секунд). Третій варіант найбільш універсальний, оскільки з товстою мішенню взаємодіють частинки крайніх траєкторій циркулюючого пучка і вона може використовуватися у всіх випадках.

5. Кінематичні розрахунки

Для визначення діапазону необхідних кутів реєстрації частинок у поляриметрі було проведено аналіз існуючих даних з аналізуючої здатності ряду процесів (див. табл.) і розрахунки кінематики з врахуванням релятивістських ефектів. У розрахунках використовувалися дві різні програми, надані А. Т. Рудчиком і А. Кліпенштейном. Перевірка роботи програм на одному і тому ж процесі показала практичну ідентичність результатів розрахунків.

Аналізуючі ядерні процеси

Іон	Аналізуючі процеси	A, T_{kq}	Енергія, MeV	Мішені
p	${}^1H(p, p) {}^1H$ ${}^2H(p, p) {}^2H$ ${}^{12}C(p, p) {}^{12}C$	$A_y(17^\circ_n) = 0.34 - 0.55$ $A(45 - 20^\circ_{с.н.і.}) = 0.2 - 0.6$ $A(5 - 20^\circ_{с.н.і.}) = 0.26 - 0.5$	200 – 1000 ¹⁾ 50 – 800 ²⁾ 100 – 600 ³⁾	C^1H C^2H C
d	${}^1H(d, d) {}^1H$ ${}^2H(d, d) {}^3H$ ${}^{12}C(d, d) {}^{12}C$	Окремі дані при середніх енергіях свідчать про великі A_y, T_{kq}		C^1H C^2H C
τ	${}^1H(\tau, \tau) {}^1H$ ${}^2H(d, p) {}^3H$	Спостережена схожість $A(\theta)$ при середніх енергіях в с.ц.і. для ${}^3He(p, p) {}^3He$ і ${}^1H({}^3He, {}^3He) {}^1H$		C^1H C^2H
6Li	${}^1H({}^6Li, {}^6Li) {}^1H$ ${}^2H({}^6Li, \alpha) {}^4He$	$T_{20}^T(A) = T_{20}^T(\alpha)$ $1 + 1 \rightarrow 0 + 0$ при $\pi = +1$		C^1H C^2H
7Li	${}^1H({}^7Li, {}^7Li) {}^1H$ ${}^1H({}^7Li, \alpha) {}^4He$	$\sqrt{5T_{10}^T(A) = -T_{10}^T(\alpha) - 2T_{30}^T(\alpha)}$ $3/2 + 1/2 \rightarrow 0 + 0$		

Примітка: 1), 2), 3) - дані наведено на рис. 1 - 3 відповідно.

Основний підсумок цих розрахунків зводиться до того, що в більшості випадків досить максимального кута реєстрації частинок у лабораторній системі 60° . При цьому енергії частинок-продуктів можуть дуже змінюватись залежно від кута їх реєстрації та мішеней, що застосовуються, однак можна вибрати відповідні умови для реєстрації обох частинок-продуктів у площині реакції при досить великих значеннях аналізуючої здатності. Це дасть можливість реєстрації їх на збіги, що істотно знизить фонові відліки й підвищить енергетичну роздільну здатність завдяки збільшенню сумарної енергії обох частинок.

6. Схема поляриметра

У поляриметрі поляризованих прискорених іонів, що пропонується, передбачається:

1) вимірювання асиметрій у двох взаємно перпендикулярних площинах під будь-яким початковим азимутальним кутом $\varphi = 0 - 90^\circ$ з охопленням всього діапазону $\varphi = 0 - 360^\circ$;

2) реєстрацію однієї або двох частинок-продуктів взаємодії поляризованих іонів пучка з ядрами мішені поляриметра в діапазоні кутів від 10 до 60° у лабораторній системі координат;

3) у системі детектування реалізується визначення кута вильоту частинок у двох взаємно перпендикулярних площинах для можливості визначення не тільки збігу частинок у часі, але й їх кінематичного зв'язку, що знизить фонові відліки, які істотно впливають на точність визначення поляризації, тобто поляриметр здатний визначати ряд параметрів: кути вильоту двох частинок-продуктів у площинах реакції, а значить, і кут між ними, час збігу цих подій з точністю біля 1 нс, енергію кожної з частинок продуктів і сумарну енергію;

4) мішені поляриметра встановлюються на дисковому тримачі, конструкція якого дозволяє автоматичну зміну під час роботи без порушення вакууму й досить оперативну їх заміну в разі виходу з ладу (руйнування пучком, механічні пошкодження);

5) для підвищення точності вимірювань система поляриметрії допускає використання системи управління поляризаційним експериментом типу розробленої в роботі [8], яка дозволяє, застосовуючи швидку зміну поляризації пучка за допомогою радіочастотних переходів у джерелі поляризованих частинок або, з деякими удосконаленнями, зміну осі поляризації за допомогою ротатора спінів для подолання резонансної деполіризації (подробіці про резонансну деполіризацію й ротатори спінів ("сибірська змійка") див. у [9]) позбутися геометричних і часових нестабільностей пучка й на порядок підвищити точність вимірювання асиметрій;

6) вся різноманітність функцій керування поляриметром, системою багатопараметричної реєстрації, накопичення й обробки інформації здійснюється ЕОМ (схема тут не розглядається).

Схему поляриметра показано на рис. 4, а пояснення наведено в підписі до рисунка. Зазначимо, що перед мішенню пучок очищається від розсіяних на залишковому газі частинок діафрагмами й вся поляриметрична система (мішень, камера, детектори) обертається навколо осі пучка й може бути встановлена при будь-яких значеннях азимутального кута $0 - 360^\circ$.

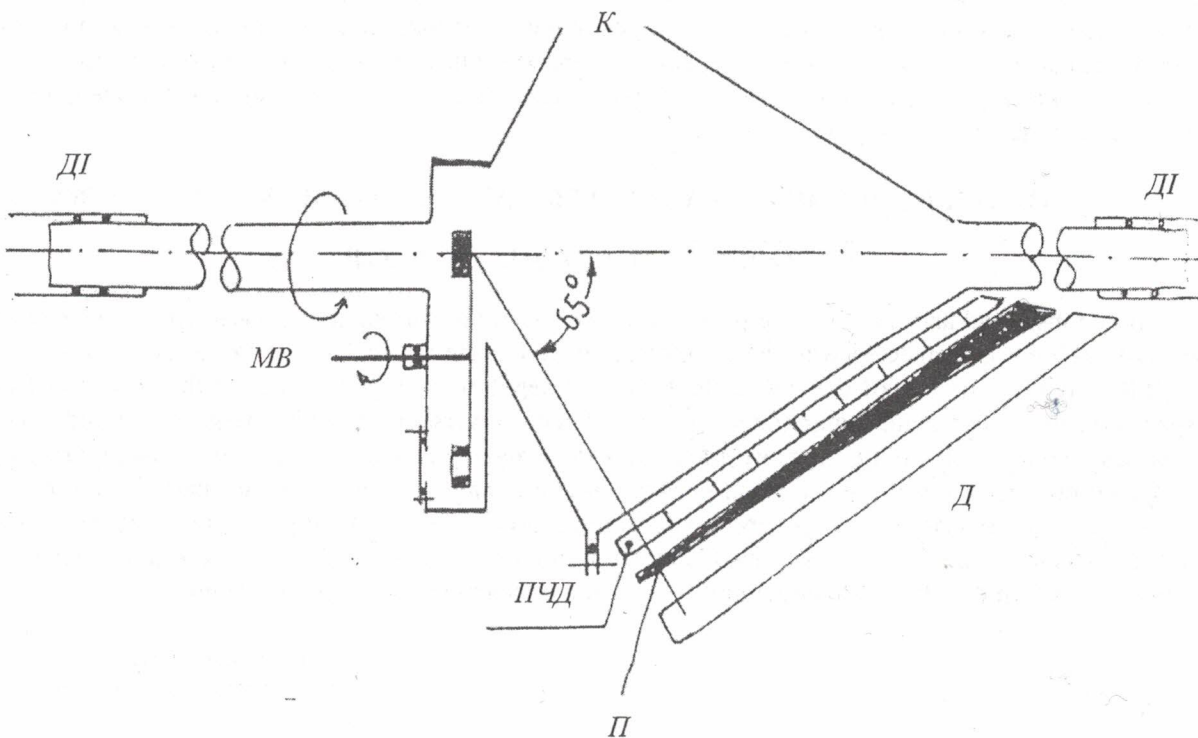


Рис. 4. Схема установки для поляриметрії: *М* – мішені, детекторні системи (*ПЧД* – позиційно-чутливий детектор, *П* – поглинач, *Д* – детектор), встановлені навколо камери (*К*) через 90° ; *МВ* – мішенний вузол; *ДІ* – деталі іонопроводу накопичувального кільця.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Заїка Н.И., Мохнач А.В., Шмарин П.Л. Физика и техника поляризованных пучков ионов. – К.: Наук. думка, 1987. – 283 с.
2. Tamii, Akimune H., Daito I. et al. // RCNP, Annual Report. – 1993. – P. 7.
3. Kobayashi Y., Kobayashi R., Nakagawa T. et al. // Nucl. Phys. – 1994. – Vol. A569, No. 4. – P. 791.
4. Zaika N.I. // Collective nuclear dynamics / Ed. by F.A. Ivanyuk. – Kiev, 1994. – P. 237.
5. Заїка М.І., Кібкало Ю.В., Магаль М.І. та ін. Продуктування поляризованих іонних пучків енергії 300 – 3000 МеВ. – (Фізичний проект. Заключний звіт). – Київ, 1994. – 40 с.
6. Заїка Н.И., Кибкало Ю.В., Левшин Е.Б. и др. // Ядер. физика. – 1971. – Т. 13. – С. 928.

7. *Yasnogorodsky A.M.* // Proc. Phys. Soc. Japan Suppl. – 1985. – Vol. 55. – P. 882.
8. *Заика Н.И., Магаль М.И.* – Киев, 1991. – 20 с. – (Препр. / НАН України. Ін-т ядерних дослід.; КИЯИ 91-27).
9. *Derbenev Ya.S., Kondratenko A.M.* // Sov. Phys. Doklady. – 1976. – Vol. 20. – P. 256.

ПОЛЯРИМЕТРЫ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПУЧКОВ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИИ 0,07 - 1 ГэВ

М. И. Заика, М. И. Магаль, В. Н. Заика

Проанализована возможность создания широкодиапазонной по энергии и атомному весу поляриметрии различных ионов, которая необходима в связи с наличием деполаризующих резонансов при ускорении в накопительных ускорительных кольцах, в том числе кольце проекта НУК ИЯД НАН Украины, и деполаризации в транспортирующих линиях ускоренных ионов. Приводятся основные требования к такому поляриметру: универсальность для различных энергий и массы ионов, максимальная эффективность, наиболее пригодные для этого ядра и реакции на них, имеющиеся в мире данные по анализирующей способности. Сформулированы основные требования к поляриметру и определена по кинематическим расчетам область углов регистрации вторичных частиц и экспериментальные методы подавления фоновых отсчетов. Приводится схема поляриметра, способного работать как при ускорении поляризованных ионов в накопительно-ускорительном кольце, так и при энергии поляризованных частиц, при которой проводится эксперимент на циркулирующем в кольце пучке. Схема включает в себя мишенный узел, камеру поляриметра и детектирующую систему.

POLARIZED BEAMS POLARIMETERS AT ENERGY RANGE 0,07 – 1 BeV

N. I. Zaika, M. I. Magal, V. N. Zaika

It is considered and analyzed the possibilities to design the various ions polarimetry at wide energy range. The problem is connected with the depolarization resonance at acceleration in the cyclic ion storage rings (ISR) including project of the ISR at the INR, and depolarization phenomena in the accelerated ions transportation lines. The main requirements are formulated: universality at wide energy range and various ions masses, maximal effectivity, the most useful suitable analyzing nuclei and reactions, contemporary data on analyzing powers. From the kinematical calculation angle ranges of the secondary particles are defined and the methods of background counts suppression are proposed. The scheme of polarimeter capable to work as at ISR ion acceleration so at polarized circulating in ISR beams needed for experiment energy is described. The scheme includes the target unit, a polarimeter chamber and detector system.

Надійшла до редакції 18.04.01,
після доопрацювання – 04.03.02.