

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Винокуров

ВИНОКУРОВ
Євген Анатолійович

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ФОТОНІВ ПРИ
ФОТОНАРОДЖЕННІ ТРИПЛЕТІВ

01.04.16 — фізика ядра і елементарних частинок

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико - математичних наук

Харків — 1997

Дисертація є рукопис

AB 39.066

Роботу виконано в ІФВЕЯФ ННЦ "Харківський фізико - технічний інститут"

Наукові керівники: доктор фізико - математичних наук

Колесников Леонід Якович

провідний науковий співробітник

ІФВЕЯФ ННЦ ХФТІ

кандидат фізико - математичних наук

Болдишев Валентин Федорович

начальник відділу ІТФ ННЦ ХФТІ

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00737589 (\$)

Офіційні опоненти:

доктор фізико - математичних наук Шульга Микола Федорович,
директор ІТФ ННЦ ХФТІ

кандидат фізико - математичних наук Афанасьєв Валерій Дмитрович,
доцент кафедри експериментальної ядерної фізики ХДУ.

Провідна організація:

Об'єднаний інститут ядерних досліджень, ОІЯД, лабораторія високих енергій, ЛВЕ ОІЯД, м.Дубна Московської області, Росія.

Захист відбудеться "26" *сгрудня* 1997р. о 15-00 год.
на засіданні Спеціалізованої Ради Д 02.02.12 при Харківському державному університеті за адресою:
310108, м. Харків, пр-т І.В.Курчатова, 31, ауд. 301.

З дисертацією можна ознайомитися у Центральній науковій бібліотеці Харківського державного університету (310077, Харків-77, м.Свободи, 4)

Автореферат розіслано "22" *листопада* 1997р.

Вчений секретар Спеціалізованої ради
доктор фізико - математичних наук,

професор

Азаренков М.О.

Актуальність роботи.

Пучки поляризованих фотонів мають широкі перспективи застосування у фізиці електромагнітних взаємодій адронів та ядер. Їх використання спрощує визначення амплітуд процесів, що вивчаються. На сучасних прискорювачах можна отримати пучки поляризованих фотонів з енергіями ω до сотень GeV. Застосування цих пучків вимагає точного знання величини їх поляризації.

Переріз процесу утворення частинок під дією лінійно поляризованих фотонів має вигляд:

$$2\pi d\sigma/d\varphi = \sigma^t + P\sigma^l \cos 2\varphi = \sigma^t[1 + P\Lambda \cos 2\varphi], \quad (1)$$

де σ^t - переріз процесу на неполяризованих фотонах, P - ступінь лінійної поляризації фотонного пучка; σ^l - частина перерізу, обумовлена поляризацією фотонів, $\Lambda = \sigma^l/\sigma^t$ - асиметрія виходу продуктів реакції при повній поляризації фотонного пучка ($P = 1$), яка часто зветься аналізуючою спроможністю, φ - азимутальний кут, що відраховується від площини поляризації фотонів. У випадку аморфного конвертора це азимутальний кут площини реєстрації продукту реакції; у випадку кристалічного конвертора це азимутальний кут площини, в якій міститься імпульс фотона \vec{k} і вектор оберненої ґратки кристала \vec{b}_1 .

Для визначення P треба використовувати реакції з великими σ^t і Λ , з точними значеннями Λ . Для процесів квантової електродинаміки (КЕД) σ^t і Λ можуть бути розраховані з необхідною точністю. У деяких адронних процесах $\Lambda \approx 1$, але точність значно нижча, а величина σ^t на декілька порядків менша, ніж у процесах КЕД.

При ω , що більше декількох десятків MeV, для вимірювання поляризації фотонів перспективними є процеси народження e^+e^- - пар на ядрах і електронах

$$\gamma + A \rightarrow A + e^+ + e^-, \quad (2)$$

$$\gamma + e^- \rightarrow e^- + e^+ + e^-. \quad (3)$$

Їх перерізи мають величину порядку 1 мбн. З ростом ω вони збільшуються.

Можливості процесу (2) в аморфному конверторі обмежені $\omega < 1\text{GeV}$. Когерентний ефект дозволяє використовувати монокристали при $\omega > 1\text{GeV}$. У випадку тонкого кристала його можливості обмежені $\omega < 40\text{GeV}$; метод селективного поглинання фотонів у товстих монокристалах ефективний при $\omega \geq 1\text{GeV}$.

Лінійна поляризація пучків когерентного гальмівного випромінювання (КГВ) електронів у монокристалах може визначатися на основі теорії КГВ по когерентному ефекту і по спектру інтенсивності КГВ. Перша можливість дає тільки значення поляризації у точці максимуму інтенсив-

вності КГВ. Друга можливість, що дозволяє одержати спектр поляризації, пов'язана з труднощами при вимірюванні спектра інтенсивності і при врахуванні реальних умов утворення КГВ.

В процесі (3) значна частина електронів віддачі має доступні для вимірювання імпульси $q \geq q_0 \sim mc$ і полярні кути Θ_1 порядку десятків градусів, що дає можливість експериментально визначати їх азимутальний кут φ_1 . Частка таких електронів слабо змінюється при збільшенні ω . У зв'язку з тим, що в кінцевому стані процесу (3) існує три частинки, що можуть бути вареєстрованими, цей процес зветься процесом народження триплетів.

У нижчому порядку теорії збурень процес (3) описується 8 діаграмами Фейнмана. При $\omega > 16mc^2$ [23,6] так звані діаграми Борселіно, що дають основний внесок у переріз, забезпечують точність повного перерізу $\sim 1\%$. Дослідження з урахуванням діаграм Борселіно перерізу $d\sigma/d\varphi_1$ в інтервалі $20mc^2 \leq \omega \leq 1000mc^2$ і перерізу $d\sigma/d\varphi_1(q_0)$ народження триплетів в $q \geq q_0$ в інтервалах $100mc^2 \leq \omega \leq 1000mc^2$ і $0,05\text{MeV}/c \leq q_0 \leq 1,25\text{MeV}/c$ в роботах Болдишева і Пересунько [21,22] і перерізів $d^2\sigma_\alpha/d\varphi_1 dq$, $d\sigma_\alpha/d\varphi_1(q_0)$, $d\sigma_\pm/d\varphi_1$, $d\sigma_\alpha/d\varphi_1 d\Theta_1$, $d\sigma_\pm/d\varphi_1 dx$ ($x = E_+/\omega$ — частина енергії, що несе позитрон), які одержано в роботах [1,3] в асимптотичних границях високих енергій, показали, що вихід електронів віддачі з процесу (3) має азимутальну асиметрію, чутливу до лінійної поляризації фотонів. Всі асимптотичні перерізи, крім $d\sigma_\pm/d\varphi_1$, не залежать від ω . При збільшенні ω значення частин і асиметрій точних перерізів наближаються до асимптотичних. При $\omega = 1000mc^2$ точні величини відрізняються від асимптотичних не більше, ніж на 10%. Значення перерізів $\sim \text{мбн}$ і асиметрії, більші 0,11, показують, що метод асиметрії електронів віддачі із процесу (3) не має верхньої межі використання. Тому дослідження процесу народження триплетів лінійно поляризованими фотонами і розробка на його основі методу вимірювання лінійної поляризації фотонних пучків надзвичайно актуальні.

Метою роботи є дослідження характеристик процесу (3), розробка методу вимірювання лінійної поляризації фотонних пучків за азимутальною асиметрією електронів віддачі і вимірювання цим методом ступеня лінійної поляризації пучка фотонів КГВ Харківського 2Гев лінійного прискорювача електронів ЛПЕ-2000.

Наукова новизна роботи.

Розроблено метод вимірювання лінійної поляризації фотонних пучків за азимутальною асиметрією електронів віддачі:

1) Вперше обчислено і досліджено залежності диференціальних перерізів народження триплетів, що враховують діаграми Борселіно, $d^3\sigma/d\varphi_1 dq d\Theta_1$, $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Delta$, $d^2\sigma/d\varphi_1 dq$, $d\sigma/d\varphi_1$, перерізів, які проінтегровано по q в інтервалі $q \geq q_0$, $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Delta(q_0)$, $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$, $d\sigma/d\varphi_1(q_0)$ і перерізів, які одержано на асимптотичній границі високих енергій фотонів $d^2\sigma_\alpha/d\varphi_1 dq$, $d\sigma_\pm/d\varphi_1(q_0)$, $d\sigma_\alpha/d\varphi_1$, $d^2\sigma_\pm/d\varphi_1 d\Theta_1$, $d^2\sigma_\alpha/d\varphi_1 dx(q_0)$, від $\omega, q, q_0, \Theta_1, x$ і ефективної маси пари Δ в інтервалах $50mc^2 \leq \omega \leq 10000mc^2$, $2m \leq$

$\Delta \leq 10m, 0,02mc \leq q \leq 10mc, 0,02mc \leq q_0 \leq 10mc, 0 \leq x \leq 1, 0 \leq \Theta_1 \leq \Theta_1(\omega, q)_{max} (\Theta_1(\omega, q)_{max}$ — максимально можливий кут вильоту електронів віддачі при заданих ω і q). Розширено інтервали обчислення і дослідження перерізів $d\sigma/d\varphi_1$ і $d\sigma/d\varphi_1(q_0)$. Виконано порівняння значень частин і асиметрій асимптотичних перерізів із значеннями відповідних величин точних перерізів.

2) Визначено оптимальні інтервали змінних для проведення експерименту по вимірюванню лінійної поляризації фотонних пучків.

3) Розраховано експерименти по вимірюванню лінійної поляризації фотонних пучків в допомогою трекових приладів і швидкодіючих детекторів. Визначені експериментальні можливості методу. Показано, що розроблений метод може використовуватись в інтервалі від ~ 25 MeV до ~ 1 TeV.

4) За допомогою стримерної камери СК-600, яку заловнено гелієм, вперше виміряно розробленим методом лінійну поляризацію фотонного пучка. Цим експериментально показано, що метод може використовуватись для вимірювання лінійної поляризації фотонних пучків.

Наукова і практична цінність роботи полягає в тому, що вперше досліджено залежність диференціальних перерізів народження триплетів лінійно поляризованими фотонами від енергії фотонів і різних кінематичних параметрів частинок кінцевого стану, вперше розроблено метод, що дозволяє вимірювати лінійну поляризацію пучків фотонів в енергію від ~ 25 MeV до ~ 1 TeV і вперше за допомогою стримерної камери СК - 600 цим методом проведено вимірювання лінійної поляризації фотонного пучка.

Положення, які винесено на захист.

В дисертації захищається детальне дослідження характеристик процесу народження триплетів і розробка методу вимірювання лінійної поляризації фотонів за азимутальною асиметрією виходу електронів віддачі при народженні e^+e^- - пар на електронах:

1) Дослідження кінематики процесу (3), визначення областей і інтервалів допустимих значень кінематичних параметрів частинок кінцевого стану.

2) Аналіз внесків у переріз 6 діаграм і їх інтерференцій, які не було враховано, кулонівських і радіаційних поправок, зв'язку електронів у атомі, обґрунтування можливості використання для вимірювання поляризації фотонів при $\omega \geq 50mc^2$ і $q \geq q_0 \approx 1mc$ перерізів народження триплетів на вільних електронах, що враховують тільки діаграми Борселіно.

3) Розробка програм обчислення і числового інтегрування перерізів народження триплетів лінійно поляризованими фотонами, обчислення різних диференціальних перерізів і аналіз їх залежності від ω , Δ , Θ_1, q , q_0, x в інтервалах $50mc^2 \leq \omega \leq 10000mc^2$, $2m \leq \Delta \leq 10m$, $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq \Theta_1 \leq \Theta_1(\omega, q)_{max}$, $0,02mc \leq q \leq 10mc$, $0,02mc \leq q_0 \leq 10mc$, пошук оптимальних умов для вимірювання лінійної поляризації фотонних пучків.

4) Розробка алгоритму для отримання значення поляризації фотонного пучка за експериментальними даними, оцінки похибки експерименталь-

ного значення поляризації і очікуваної точності вимірювання поляризації в експериментах, що плануються, розрахунки експериментів, аналіз експериментальних можливостей запропонованого методу.

5) Експеримент по вимірюванню лінійної поляризації пучка КГВ ЛШЕ - 2000 в енергію фотонів у когерентному максимумі 60 МеВ.

Апробація роботи і публікації.

Роботу виконано у Харківському фізико - технічному інституті.

Основні результати роботи доповідались на Всесоюзних семінарах в електромагнітних взаємодій адронів у Харкові, на Всесоюзній конференції в розробки та практичного використання електронних прискорювачів (Томськ, 1975р), на Конференції в ядерно - фізичних досліджень, присвяченої 50 - річчю здійснення в СРСР реакції розщеплення атомного ядра (Харків, 1982р), на Сесії відділу ядерної фізики АН СРСР (Москва, 1986р), на Єврофізичній конференції (Барі, 1985р), на V Робочій нараді зі спінових явищ у фізиці високих енергій (Протвіно, 1993р), на конференціях PANIC у Гейдельберзі в 1984 і 1986 рр. Матеріали дисертації надруковано у 20 роботах, список яких наведено в кінці автореферату.

Структура і об'єм роботи.

Дисертація складається із вступу, 3 глав, висновків і списку літератури. Всього 178 сторінок, включаючи 43 малюнки, 10 таблиць та список цитованої літератури, що містить 113 назв.

Стислий зміст дисертації.

У Вступі коротко розглядаються існуючі методи вимірювання лінійної поляризації фотонів, передумови для розробки методу вимірювання лінійної поляризації фотонних пучків за асиметрією електронів віддачі в процесу (3), ставиться задача по розробці методу і вимірюванню поляризації фотонного пучка, обґрунтовується актуальність досліджень, пов'язаних в розробку методу і вимірюванням поляризації, відзначається новизна одержаних результатів, викладені основні положення, що вносяться на захист.

В I главі розглянуто основні характеристики процесу народження триплетів неполяризованими фотонами. Розглянуто кінематику процесу. Оцінюється внесок 6 неврахованих діаграм Фейнмана, кулонівських і радіаційних поправок до перерізу народження триплетів неполяризованими фотонами. Показано, що при $\omega \geq 16mc^2$ врахуванням тільки діаграм Борселіно забезпечується точність повного перерізу не гірше 1,2%. Кулонівська поправка при народженні триплетів істотна у межах декількох КеВ від порогу. Нею можна знехтувати, коли енергія фотонів вище порогу на 1 МеВ ($\omega_{\text{пор}} = 4mc^2$). Урахування радіаційної поправки зводиться до множення на 1,01 перерізу, одержаного у нижчому порядку теорії обурень. При $q \geq q_0 \geq 1$ тс електрони атомів можна вважати вільними. Результати експериментів в вимірювання лінійної поляризації фотонних пучків при $\omega \geq 16mc^2$ можна описувати перерізами, що відповідають діаграмам Борселіно. Наведено формули для різних диференціальних перерівів наро-

дження триплетів лінійно поляризованими фотонами, які зараз відомі. З цих формул випливає, що переважний вихід електронів віддачі знаходиться у площині, яка перпендикулярна площині поляризації фотонів.

Очікувана похибка вимірювання поляризації в експерименті, що планується, $\Delta P_{\text{оч}}$, пропорційна до [8,13,12,16,6] $N^{-1/2}(g)\Lambda^{-1}(g)$, де $N(g)$ — число зареєстрованих триплетів з параметрами, що потрапили у вибрану область з межею g . $N(g)$ пропорційно $\sigma^t(g)$ — перерізу, який проінтегровано по області змінних усередині g . Оптимальні умови експерименту по вимірюванню поляризації P впливають з аналізу функції

$$L(g) = \frac{\Delta P(g_{\text{tot}})}{\Delta P(g)} = \frac{\Lambda(g)}{\Lambda(g_{\text{tot}})} \left[\frac{\sigma^t(g)}{\sigma^t(g_{\text{tot}})} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

величина якої показує, у скільки разів підвищиться точність вимірювання поляризації при використанні випадків, що попали в область g замість випадків із усієї допустимої кінематикою області змінних g_{tot} . Відношення $\sigma^t(g)/\sigma^t(g_{\text{tot}})$ показує, яка частина випадків із області g_{tot} попадає у область g . Відношення $\Lambda(g)/\Lambda(g_{\text{tot}})$ показує, у скільки разів чутливіший метод при використанні області g замість області g_{tot} .

В главі II досліджуються залежності частин різних диференціальних перерізів народження триплетів лінійно поляризованими фотонами, їх асиметрії і функції $L(g)$ від різних змінних в інтервалах $50mc^2 \leq \omega \leq 10000mc^2$, $0,02mc \leq q \leq 10mc$, $0,02 \leq q_0 \leq 10mc$, $0 \leq \Theta_1 \leq \Theta_1(\omega, q)_{\text{max}}$, $2m \leq \Delta \leq 10m$, $0 \leq x \leq 1$. Частини і асиметрії точних перерізів порівнюються із значеннями відповідних величин асимптотичних перерізів. Незалежні від поляризації частини перерізів порівнюються з експериментальними і теоретичними даними, що є зараз в літературі. Визначаються оптимальні умови для вимірювання лінійної поляризації фотонних пучків.

Частини перерізів $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Delta(q_0)$, $d^2\sigma/d\varphi_1 dq$, $d\sigma/d\varphi_1(q_0)$ і $d\sigma/d\varphi_1$ [5,12,16,6] при збільшенні ω швидко ростуть при малих енергіях фотонів і досить повільно при $\omega > 500mc^2$. Асиметрія перерізу $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Delta(q_0)$ практично не залежить від ω ; асиметрії перерізів $d^2\sigma/d\varphi_1 dq$, $d^2\sigma/d\varphi_1(q_0)$, і $d\sigma/d\varphi_1$ при збільшенні ω зменшуються.

В інтервалі ω , що досліджується, частини перерізів $d^3\sigma/d\varphi_1 dq d\Theta_1$, $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ і $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1$ [6] мають пороги, положення яких при заданих Θ_1 і q або q_0 визначаються виразом

$$\omega_{\text{пор}}(q, \Theta_1) = m(E_1 - m)/(q \cos \Theta_1 - E_1 + m) \quad (5)$$

у випадку $d^3\sigma/d\varphi_1 dq d\Theta_1$ і $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ та виразом

$$\omega_{\text{пор}}(\Theta_1) = 4mc^2/\cos^2 \Theta_1 \quad (6)$$

у випадку $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1$. E_1 — енергія електрона віддачі.

Поблизу порогу частини цих перерізів швидко ростуть при збільшенні ω . Їх асиметрії наближаються до одиниці при наближенні ω до порога.

Збільшення ω біля порогу приводить до того, що асиметрії дуже швидко зменшуються.

Після максимумів частин характер залежності від ω частин і асиметрій перерізів $d^2\sigma/d\varphi_1 d\varphi_1 dq d\Theta_1$, $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ і $d^2\sigma/d\varphi_1 dq d\Theta_1$ відрізняється. Він залежить від Θ_1 , а у випадку перших двох перерізів — від q і q_0 , відповідно. З ростом Θ_1 пороги і максимуми частин пересуваються у бік більших ω , значення частин у максимумах зростають.

У логарифмічному масштабі по осях координат при збільшенні ω зменшення частин перерізу $d^2\sigma/d\varphi_1 dq d\Theta_1$ після максимумів близьке до лінійного. Його асиметрія після крутого спаду біля порогу повільно зменшується під час зростання ω до величини, близької до нуля. При малих q_0 залежності частин перерізу $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ від ω мають широкі максимуми. Із збільшенням q_0 максимуми частин у залежності від ω розширюються і при наближенні до верхньої межі при заданих ω і Θ_1 , $q(\omega, \Theta_1)_{max}$ зникають. В області великих ω залежності частин і асиметрій перерізів $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ і $d\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1$ від енергії фотонів мають тенденцію вийти на плато. Асиметрія в області плато 10 — 20%.

З характеру залежності від ω частин і асиметрій різних диференціальних перерізів випливає, що у досить широкому інтервалі ω характер залежності частин і асиметрій досліджуваних перерізів від Δ , q, q_0 і Θ_1 не змінюється із зміною енергії фотонів. Зі збільшенням ω частин і асиметрій перерізів $d^2\sigma/d\varphi_1 dq, d\sigma/d\varphi_1(q_0)$, $d\sigma/d\varphi_1$ і $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ наближаються до значень відповідних частин і асиметрій перерізів $d^2\sigma_a/d\varphi_1 dq$, $d\sigma_a/d\varphi_1(q_0)$, $d\sigma_a/d\varphi_1$ і $d^2\sigma_a/d\varphi_1 d\Theta_1$. При $\omega = 10000mc^2$ точні величини відрізняються від асимптотичних не більше, ніж на 5 %. Співпадання σ^i з σ_B із роботи Хауга [23] свідчить про правильність наших обчислень.

У розглянутих інтервалах q і q_0 при заданих ω частини перерізів $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Delta(q_0)$, $d^2\sigma/d\varphi_1 dq$, $d\sigma/d\varphi_1(q_0)$, $d^2\sigma_a/d\varphi_1 dx(q_0)$ [10,5,12,16,6] швидко зменшуються з ростом q і q_0 , відповідно. Асиметрія перерізу $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Delta(q_0)$ росте, коли q_0 збільшується на відміну від асиметрій інших перерізів цієї групи, які зменшуються при збільшенні q і q_0 . Перерію $d\sigma_a^i/dq$ і $d\sigma^i/dq$ добре узгоджуються з експериментальними розподілами по q .

При заданих ω і Θ_1 залежності від q частин перерізу $d^2\sigma/d\varphi_1 dq d\Theta_1$ [6] мають максимуми поблизу нижньої і верхньої меж $q(\omega, \Theta_1)_{min}$ і $q(\omega, \Theta_1)_{max}$ допустимих значень q , між якими знаходяться мінімуми. Асиметрія цього перерізу має мінімуми у точках мінімумів його частин. При наближенні q до меж вона наближається до одиниці. Зі збільшенням ω і зменшенням Θ_1 інтервал значень q розширюється. Зі зменшенням Θ_1 значення частин у максимумах і мінімумах зменшуються. При збільшенні ω значення частин у мінімумах зменшуються, а у максимумах збільшуються. Оскільки при $\omega \rightarrow \infty$ $q(\omega, \Theta_1)_{min} \rightarrow 0$, а $q(\omega, \Theta_1)_{max}$ швидко наближається до $2m \cos \Theta_1 / \sin^2 \Theta_1$, пересування правих максимумів при $\omega > 500mc^2$ незначне.

Біля меж частини перерізу $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ [6] швидко зменшуються коли q_0 збільшується. При $q_0 \rightarrow q(\omega, \Theta_1)_{max}$ $\Lambda(q_0) \rightarrow 1$. Біля $q(\omega, \Theta_1)_{max}$ у залежностей від q_0 частин і асиметрії з'являється плато. Ширина його росте з зростанням ω і зменшенням Θ_1 . Значення асиметрії в області плато $\sim 12\%$.

Залежності частин перерізу $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Delta(q_0)$ від Δ [5,12, 16,6] мають максимуми поблизу $\Delta = 2m$. При заданих q_0 і $\omega > 200mc^2$ їх положення не залежить від ω . Коли q_0 збільшується, значення частин швидко зменшуються, їх максимуми стають більш широкими і всуваються у бік більших Δ . Асиметрія з ростом Δ швидко зменшується. При $\Delta \rightarrow 2m$ вона наближається до одиниці.

Криві залежності від x частин і асиметрії перерізу $d^2\sigma_x/d\varphi_1 dx(q_0)$ [10,12, 16,6] симетричні відносно $x = 0,5$. Значення $d\sigma_x^i/dx(q_0, x)$ і $\Lambda(q_0, x)$ дорівнюють нулю при $x = 0$ і $x = 1$ і мають максимуми при $x = 0,5$. Залежність $d\sigma_x^i/dx(q_0)$ від x має мінімум при $x = 0,5$. При $q_0 = 1mc$ $d\sigma_x^i/dx(q_0)$ добре узгоджується з експериментальним розподілом по x в інтервалі $0,1 \leq x \leq 0,9$.

В залежності від Θ_1 [12,16,6] частини і асиметрії перерізів $d^3\sigma/d\varphi_1 dq d\Theta_1$ $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ і $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1$ [12,16,6] ростуть при збільшенні Θ_1 . Поблизу максимального кута $\Theta_1(\omega, q)_{max}$ при заданих ω і q (або q_0) у випадку $d^3\sigma/d\varphi_1 dq d\Theta_1$ і $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ і $\Theta_1(\omega)_{max}$ при заданих ω у випадку $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1$ частини перерізів мають максимуми. При наближенні Θ_1 до $\Theta_1(\omega, q)_{max}$ або до $\Theta_1(\omega)_{max}$, відповідно, їх асиметрії наближаються до одиниці. В області малих кутів вони повільно зростають при збільшенні Θ_1 . В цій області Θ_1 асиметрія перерізу $d^3\sigma d\varphi_1 dq d\Theta_1$ порядку долей відсотка, а асиметрії перерізів $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ і $d^2\sigma d\varphi_1 d\Theta_1$ порядку 10 - 12 %. Зі збільшенням ω і зменшенням q і q_0 в інтервалах $0,1mc \leq q \leq 10mc$ і $0,1mc \leq q_0 \leq 10mc$ максимуми частин і асиметрії всуваються у бік більших Θ_1 . В широкій області Θ_1 частини і асиметрія перерізу $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ не залежать від q_0 . При $\omega > 200mc^2$ їх залежності від Θ_1 практично не змінюються при збільшенні ω . При $\omega = 10000mc^2$ його частини та асиметрії відрізняються від асимптотичних не більше, ніж на 5 %. Перерізи $d\sigma^i/d\Theta_1(q_0)$ і $d\sigma_x^i/d\Theta_1$ узгоджуються [17,7,6] в експериментальними розподілами по Θ_1 при $\Theta_1 \leq 55^\circ$. Поведінка експериментальних розподілів по Θ_1 вимагає ретельних теоретичних досліджень.

З результатів проведеного аналізу випливає [12,16,6], що для оптимізації вимірювання ступеня лінійної поляризації фотонного пучка P — досягнення максимальної точності при мінімальній статистиці — необхідно при вимірюваннях відібрати такі випадки: 1) починаючи з можливо меншого імпульсу електронів віддачі; 2) близькі до симетричних по розподілу енергій електронів і позитронів пари, $x = 0,5$; 3) з інваріантними масами пари в області максимуму розподілу по Δ , $2m \leq \Delta \leq \Delta_0$; 4) з полярними кутами Θ_1 поблизу максимальних кутів вильоту електронів віддачі; 5) з азимутальними кутами φ_1 в інтервалах поблизу площини поляризації і

поблизу перпендикулярної їй площини з напівшириною $\varphi_{10} = 33,4^\circ$.

У третій главі аналізуються експериментальні можливості методу при використанні трекових приладів і швидкодійних детекторів. Описується експеримент по вимірюванню лінійної поляризації пучка КГВ ЛПУ - 2000 за допомогою стримерної камери СК - 600.

На межі області припустимих значень $q = |\vec{p}_1|$ і Θ_1 [6] $\Delta = 2m$; в середині її $\Delta > 2m$. При $\Delta \rightarrow 2m$ переріз зменшується, а асиметрія наближається до одиниці. Для вимірювання поляризації використовуються випадки в $q \geq q_0$. Вимірюючи $\omega, q = |\vec{p}_1|$ і Θ_1 або величини імпульсів e^+ і e^- , \vec{p}_+ , \vec{p}_- і кут між ними Θ_{+-} , можна, користуючись виразами

$$\Delta^2 = -2(\omega + m)(E_1 - m) + 2q\omega \cos \Theta_1, \quad (7)$$

$$\Delta^2 = 2m \left(1 + \frac{p_+^2 + p_-^2 + m^2}{E_+ E_- + p_+ p_-} \right) + 4p_+ p_- \sin^2(\Theta_{+-}/2), \quad (8)$$

відбрати випадки в Δ в інтервалі

$$2m \leq \Delta \leq \Delta_0. \quad (9)$$

E_1, E_+ , E_- — енергії електрона віддачі і фрагментів пари.

У випадку трекових приладів з повільним набором статистики для вимірювання поляризації треба використовувати всю область $q \geq q_0$. У випадку водневої пувиркової камери ВК -40 [8,13,6] і стримерної камери СК -600 [17,7,6] для досягнення точності 10 - 18 % необхідно мати ~ 10000 випадків. Такі прилади не можуть бути оперативними моніторами поляризації, оскільки відомості про вектор поляризації отримуються після довгої процедури обробки. Запропонований метод абсолютний і дозволяє калібрувати неабсолютні методи, які можуть забезпечити оперативний моніторинг.

Застосування швидкодійних детекторів полегшує набір статистики, дозволяє оптимізувати умови експерименту, спрощує процес і скорочує час отримання потрібної інформації. При цьому може використовуватись частина області $q \geq q_0$. Для вимірювання поляризації здаються розумними дві можливості: 1) відбрати випадки в вузькій області значень q і Θ_1 поблизу гранці і 2) відбрати випадки в широкій області q і Θ_1 .

При використанні (7) відносна похибка $\delta\Delta/\Delta \sim 1\%$ досягається при $\Delta\omega/\omega \sim 0,01$, $\Delta p/p \sim 0,01/\omega$, $\Delta\Theta \sim 0,01\sqrt{2}/\omega$. Такі жорсткі вимоги роблять важким відбір випадків у інтервалі (9) за даними кінематичних параметрів електронів віддачі.

При $(E_+ + E_-)^2 \sin^2(\Theta_{+-}/2) \ll mc^2$ і $\Delta p_+/p_+ = \Delta p_-/p_- \sim 10^{-3}$ можна, використовуючи (8), відбрати випадки в інтервалу (9). В аналізаторі лінійної поляризації, розробленому у Мінці [24] використана перша можливість. Його аналізуюча спроможність зменшується з ростом ω від 90 % при $\omega = 100 \text{ MeV}$ до 70% при $\omega = 700 \text{ MeV}$. Для обереження високого значення Λ треба при збільшенні ω зменшувати Θ_{+-} , а це може обмежити

можливості методу. З аналізу розподілу по x випливає, що навіть при дуже високих енергіях фотонів у цього приладу може бути $\Lambda \approx 0,25$.

Поляриметр у Токіо [25,6] побудовано з спінтіляторів. Використовується друга можливість. Електрони віддачі q в інтервалі $1,9 \text{ MeV/c} \leq q \leq 10 \text{ MeV/c}$ реєструються 5 ідентичними телескопами лічильників C_1, C_2, C_3 , що стягують інтервали полярних кутів $10^\circ \leq \Theta_1 \leq 40^\circ$ і азимутальних кутів $= \pm 15^\circ$ і встановлено під кутами φ_1 , які дорівнюють $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ і 270° . Фрагменти пар реєструються телескопом лічильників P_1 і P_2 .

Для о'ясування можливостей цього приладу і розробленого методу обчислено [16,18,6] частини і асиметрії перерізу $d\sigma/d\varphi_1(\Theta_{10}, \Theta_{11}, p_{10}, p_{11})$ народження триплетів в інтервалах $1,9 \text{ MeV/c} \leq q = |p_1| \leq 10 \text{ MeV/c}$, $10^\circ \leq \Theta_1 \leq 40^\circ$ при $50 \text{ MeV} \leq \omega \leq 10000 \text{ MeV}$. Частини перерізу повільно зростають, а асиметрія повільно зменшується при збільшенні ω . В інтервалі 600 - 10000 MeV асиметрія практично не змінюється і дорівнює 0,12. При $\beta = 0,6$ і $\Lambda = 0,12$ очікується відносна похибка вимірювання

$$\left(\frac{\Delta P}{P}\right)_{\text{оч}} \approx \frac{5 \times 10^3}{\sqrt{N_7 T}}, \quad (10)$$

де N_7 — число фотонів з потрібною енергією, що потрапляють на мішень за 1 сек, T — час експозиції.

Аналіз показав [16,6], що цей поляриметр, а отже і метод, може працювати як абсолютний монітор поляризації, що оперативно видає відомості про величину і напрямок вектора поляризації. Якщо фрагменти пар при високих енергіях фотонів аналізуються по енергії, то при використанні симетричного відносно $x = 0,5$ інтервала з шириною $u = x_1 - x_0 = 0,4$ забезпечується та ж точність, що і при вимірюванні поляризації без аналізу фрагментів пар по енергії. При $u = 0,7$ точність підвищується на 10 % при використанні 70 % випадків із всього інтервалу ($u = 1$).

За допомогою стримерної камери СК - 600 з розмірами $600 \times 600 \times 120 \text{ мм}^3$, яку заповнено гелієм, проведено експеримент [17,6,7] з вимірювання запропонованим методом лінійної поляризації пучка КГВ 600 MeV електронів ЛПЕ - 2600 з енергією фотонів в когерентному максимумі 60 MeV.

Набрано біля 8000 стереофотографій. Проїшли обробку 307 випадків. В області когерентного максимуму ($45 \text{ MeV} \leq \omega \leq 75 \text{ MeV}$) отримано 118 випадків. По даним цих випадків побудовано розподіли триплетів по ω , спектр інтенсивності пучка фотонів $I(\omega)$, що вийшов з кристалу алмаза, розподіли триплетів по імпульсу q , полярному Θ_1 і азимутальному φ_1 куту електронів віддачі.

Поляризація пучка фотонів визначалась на основі теорії КГВ за спектром інтенсивності $I(\omega)$ і на основі асиметрії електронів віддачі триплетів методами асиметрії, найменших квадратів і максимуму вірогідності.

Розподіли триплетів по ω , спектри інтенсивності і енергетичний спектр поляризації фотонів [17,7] мають максимуми при $\omega = 60 \text{ MeV}$. Поляри-

зачія в максимумі $P_{max} = 0,712 \pm 0,15$. Ї середнє значення в інтервалі $45\text{MeV} \leq \omega \leq 75\text{MeV}$ $P(45, 75) = 0,66 \pm 0,15$. Розподіли по q випадків з усіма ω і випадків з ω в інтервалі $45\text{MeV} \leq \omega \leq 75\text{MeV}$ угоджуються [17,7] з розподілом $d\sigma^2/dq$ при $\omega = 100mc^2$. Розподіли по Θ_1 [17,7] в цих інтервалах ω угоджуються з експериментальними розподілами і з перерізами $d\sigma^2/d\Theta_1$ і $d\sigma_1^2/d\Theta_1$ в інтервалах $\Theta_1 < 50^\circ$ у випадку явищ з усіма ω і в інтервалі $\Theta_1 < 60^\circ$ у випадку явищ із області когерентного максимуму. Таким чином, наші експериментальні розподіли свідчать про достовірність експериментального визначення енергії фотонів, кінематичних параметрів фрагментів пар і електронів віддачі.

Для визначення лінійної поляризації фотонного пучка за асиметрією електронів віддачі використовувались випадки в інтервалі $45\text{MeV} \leq \omega \leq 75\text{MeV}$. При використанні методу асиметрії відбирались випадки з азимутальними кутами в інтервалах $-25^\circ \leq \varphi_1 \leq 25^\circ$ і $155^\circ \leq \varphi_1 \leq 205^\circ$ біля площини поляризації і в інтервалах $65^\circ \leq \varphi_1 \leq 115^\circ$ і $245^\circ \leq \varphi_1 \leq 295^\circ$ біля площини, що перпендикулярна до площини поляризації. Числа випадків $N_{\parallel} = 22$ і $N_{\perp} = 27$ дають

$$P = 0,68 \pm 0,94.$$

Для визначення поляризації за методами максимуму вірогідності (ММВ) і найменших квадратів (МНК) використовувались два набори випадків: 1) випадки з усіма Θ_1 і 2) випадки з $\Theta_1 \leq 60^\circ$. Для цих наборів одержано означення: по методу МНК

$$P = 0,53 \pm 0,45 \quad \text{і} \quad P = 0,59 \pm 0,83,$$

по методу ММВ

$$P = 0,66 \pm 0,54 \quad \text{і} \quad P = 0,66 \pm 1,18.$$

Як видно, всі 5 значень поляризації, які отримано на основі методу асиметрії електронів віддачі триплетів, угоджуються зі значенням $P(45, 75) = 0,66 \pm 0,15$, яке отримано на основі теорії КГВ. Великі похибки вимірювання істотні і пов'язані з малою статистикою. Розрахунок показав, що для забезпечення точності $\sim 10\%$ потрібно 10000 випадків. Одержані значення поляризації показують можливість використання для її вимірювання методу асиметрії електронів віддачі. Результати експерименту у Токіо [26] підтверджують життєздатність методу асиметрії електронів віддачі.

У Висновках сформульовано основні результати роботи:

Вперше розроблено метод вимірювання ступіня лінійної поляризації фотонних пучків за азимутальною асиметрією виходу електронів віддачі з процесу (3). При розробці методу виконано роботи:

1. Досліджено кінематику процесу народження триплетів. Визначено області і інтервали допустимих значень кінематичних параметрів частинки кінцевого стану.

2. Обґрунтована можливість використання для розробки методу вимірювання лінійної поляризації фотонів диференційних перерізів, що враховують тільки діаграми Борселіно.

3. Вперше проведено аналіз різних диференційних перерізів народження триплетів лінійно поляризованими фотонами. Знайдено, що в досліджуваних інтервалах змінних величина перерізу порядку $\sim m^2$, величина асиметрії змінюється від 0 до ~ 1 . При $\omega \geq 50 \text{ MeV}$ біля 90 % випадків в $q \geq q_0 \sim mc$ мають $\Theta_1 > 20^\circ$. Це дозволяє надійно визначати азимутальний кут електрона віддачі. При збільшенні енергії фотонів ω частини і асиметрії точних перерізів наближаються до відповідних асимптотичних величин. Значення частин і асиметрій асимптотичних перерізів відрізняються від відповідних величин точних перерізів при $\omega = 10000 mc^2$ не більше, ніж на 5 %. Незалежні від поляризації частини перерізів узгоджуються з експериментальними і теоретичними розподілами, що є в літературі.

4. Знайдено оптимальні області кінематичних параметрів для проведення експериментів по вимірюванню лінійної поляризації фотонів.

5. Проаналізовано експериментальні можливості розробленого методу вимірювання лінійної поляризації фотонних пучків. Показано, що він найбільш перспективний з усіх відомих методів вимірювання лінійної поляризації фотонів і може використовуватись в інтервалі енергій фотонів від 25 MeV до $\sim \text{TeV}$.

6. Проведено експеримент, в якому вперше методом вимірювання асиметрії електронів віддачі визначено лінійну поляризацію пучка фотонів. Результати цього експерименту підтверджують можливості використання метода.

Основні результати дисертації опубліковано у таких роботах:

Література

- [1] Винокуров Е.А., Кураев Э.А. Об образовании триплетов поляризованными фотонами. ЖЭТФ, 1972, т.63, вып.4(10), ст.1142-1150.
- [2] Винокуров Е.А., Кураев Э.А., Меренков Н.П. Радиационные поправки к образованию e^+e^- - пары фотоном высокой энергии на электроне и на ядре. ЖЭТФ, 1974, т.66, вып.6, ст.1916-1925.
- [3] Винокуров Е.А., Меренков Н.П. Об образовании триплетов поляризованными фотонами высоких энергий. ЯФ, 1975, т.21, вып.4, ст.781-784.
- [4] Винокуров Е.А., Болдышев В.Ф. Об измерении линейной поляризации фотонных пучков высоких энергий. УФЖ, 1983, т.28, N 4, ст.492-497.

- [5] *Винокуров Е.А., Болдышев В.Ф.* Об измерении поляризации фотонов по дифференциальным сечениям рождения триплетов. ЯФ. 1984, т. 40, вып.3(9), ст.731-734.
- [6] *Болдышев В.Ф., Винокуров Е.А., Меренков Н.П., Пересунько Ю.П.* Метод измерения линейной поляризации фотонных пучков по асимметрии электронов отдачи при фотообразовании e^+e^- - пар на электронах. ЭЧАЯ, 1994, т.25, вып.3, ст.696 - 778. Phys. Part. Nucl.1994, v.25(3), p.292 - 331.
- [7] *Болдышев В.Ф., Винокуров Е.А., Волощук В.И. и др.* Измерение линейной поляризации фотонов по асимметрии электронов отдачи в фоторождении триплетов. ЯФ, 1995, т.58, N 1, ст.43 - 49.
- [8] *Болдышев В.Ф., Винокуров Е.А., Гетьман В.А. и др.* Расчет эксперимента по определению степени поляризации пучка когерентного тормозного излучения электронов линейного ускорителя ЛУЭ - 2000 с помощью водородной пузырьковой камеры ВК - 40. ВАНТ. Сер. Физика высоких энергий. 1972, вып.2(2), ст.19-20.
- [9] *Винокуров Е.А., Гетьман В.А., Ляхно Ю.П. и др.* Экспериментальное распределение электрон - позитронных пар по доле энергии, уносимой позитроном. ВАНТ. Серия: Физика высоких энергий и атомного ядра. 1975. Вып.2(14), ст.14.
- [10] *Болдышев В.Ф., Винокуров Е.А., Кураев Э.А. и др.* Об использовании фоторождения триплетов для измерения поляризации фотонных пучков трековыми приборами. ВАНТ. Серия: Физика высоких энергий и атомного ядра.1976, вып.1(17), ст.18-24.
- [11] *Винокуров Е.А., Болдышев В.Ф.* Оптимизация измерения линейной поляризации фотонных пучков высоких энергий. ВАНТ. Серия: Общая и ядерная физика. 1984, вып.2(27), ст.31-33.
- [12] *Болдышев В.Ф., Винокуров Е.А.* Процесс фоторождения триплетов как детектор поляризации фотонных пучков высоких энергий. ВАНТ, 1986, вып.1(34), ст.124-130.
- [13] *Вацет П.И., Винокуров Е.А., Гетьман В.А. и др.* Расчет эксперимента по определению степени поляризации пучка когерентного тормозного излучения электронов линейного ускорителя ЛУЭ - 2000 с помощью водородной пузырьковой камеры ВК - 40. Препринт ХФТИ 73-4. Харьков. 1973.
- [14] *Винокуров Е.А., Кураев Э.А., Меренков Н.П. и др.* Радиационные поправки к образованию e^+e^- - пар фотонами высоких энергий на электроне и на ядре. Препринт ИЯФ 118-74. Новосибирск.1974.

- [15] Болдышев В.Ф., Винокуров Е.А., Пересуныко Ю.П. Эффективный метод измерения поляризации фотонных пучков. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Москва. ЦНИИ атоминформ. 1983, часть 3, ст. 133-136.
- [16] Болдышев В.Ф., Винокуров Е.А., Пересуныко Ю.П. Метод измерения линейной поляризации фотонных пучков по асимметрии электронов отдачи при фотообразовании пар на электронах. Обзор:-М.: ЦНИИ атоминформ, 1990.-36с.
- [17] Болдышев В.Ф., Винокуров Е.А., Волощук В.И. и др. Измерение линейной поляризации фотонного пучка с энергией 60 МэВ по асимметрии электронов отдачи в фоторождении e^+e^- - пар на электронах.Препринт ХФТИ 92-42.Харьков. 1992.
- [18] Басков В.А., Ким В.В., Сергиенко В.И., Хабло В.А., Винокуров Е.А. и др. Поляризация излучения электронов с энергией 28 ГэВ и 1 ТэВ при движении их вблизи плоскости кристалла. В сб.: Мат.Всесоюз.сов."Проблемы применения эффектов каналирования частиц кристаллами в физике высоких энергий". Протвино.1991,ст.73-78.
- [19] Boldyshev V.F., Vinokurov E.A., Kuraev E.A. et al. Method for measuring of the photon beam linear polarization by means of recoil electron asymmetry in e^+e^- pair photoproduction on electrons. V Workshop on High Energy Spin Physics. Protvino, 20-24 September 1993. p.330-333.
- [20] Boldyshev V.F., Vinokurov E.A. Triplet photoproduction process as a photon polarization detector. PANIC Particles and Nuclei - Tenth Intern. Conf. Book of Abstr. v.1, Heidelberg. July 30-Aug. 3, 1984.
- Цитована література
- [21] Болдышев В.Ф., Пересуныко Ю.П. Фотообразование электронно - позитронных пар на электронах и анализ поляризации фотонных пучков. ЯФ, 1971, т.14, вып.5, ст. 1027-1032.
- [22] Болдышев В.Ф., Пересуныко Ю.П. К определению поляризации фотонов по асимметрии электронов отдачи в триплетах. ЯФ, 1974, т.19, Вып.1, ст.144-147.
- [23] Haug E. Bremsstrahlung and pair production in the field of free electrons. Z. Naturforsch 1975,v. 30a, p. 1099-1113.
- [24] Schafer F., et al. with Ahrens J., Peise J., Schmitz M. et al. Analyzer for linearly polarized photons using triplet production. Gordon Research Conference on photonuclear reactions. August 6-10, 1990, Tilton, New Hampshire, 1990.

- [25] *Endo I., Kasai S., Harada M. et al.* Detection of recoil electrons in triplet photoproduction. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1989, v.A 280, p.144-146.
- [26] *Iwata Y. Endo I., Tobiyaama M. et al.* New polarimeter for high energy gamma - rays. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.1993, v.A 336, p.146-149.

Винокуров Е.А. Исследование поляризации фотонов при фоторождении триплетов. Диссертация (рукопись) на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 — физика ядра и элементарных частиц, Харьков, 1997.

Рассматриваются основные характеристики процесса фоторождения e^+e^- - пар на электронах (триплетов) и обсуждаются возможности использования этого процесса для измерения степени линейной поляризации фотонных пучков в широком интервале энергий от 25 МэВ до нескольких ТэВ. Анализируется поведение частей различных дифференциальных сечений и азимутальной асимметрии вылета электронов отдачи в зависимости от энергии фотона, величины импульса и полярного угла вылета электронов отдачи, минимально детектируемого импульса отдачи, инвариантной массы рожденной пары, доли энергии, уносимой позитроном. Определяются оптимальные условия для проведения экспериментов, обсуждаются возможности создания поляриметра на основе измерения азимутальной асимметрии электронов отдачи с использованием треховых приборов и быстродействующих счетчиков. Приводятся результаты эксперимента по измерению линейной поляризации фотонов, проведенного на Харьковском ускорителе электронов.

Abstract

Vinokurov E.A. Investigation of photon polarizations by triplet photoproduction.

The dissertation (manuscript) for obtaining scientific degree of the candidate of science in the mathematics and physics corresponding to speciality 01.04.16 — nuclear physics and physics of elementary particles, Kharkov, 1997.

The main characteristics of the process of e^+e^- pair photoproduction on the electrons (triplets) are reviewed and the possibility of this process to be used for the photon beam linear polarization measurement in the wide energy region from 25 MeV to few TeV is discussed. The differential cross section and the azimuthal asymmetry of recoil electrons are determined versus: the photon energy; the recoil electron momentum and its polar angle; the minimal recoil electron momentum which can be detected; e^+e^- pair invariant mass, and versus the positron energy. The optimal kinematical conditions for the experiments are determined and the possibility of constructing the polarimeter is discussed. This polarimeter is to be based on the recoil electron azimuthal asymmetry measurement by means of tracking devices and high-speed counters. The results of the experiment on the photon linear polarization measurement, which was held at the Kharkov electron accelerator, are presented.

430852

AB 39.066