

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Винокуров

ВИНОКУРОВ
Євген Анатолійович

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІ ФОТОНІВ ПРИ
ФОТОНАРОДЖЕННІ ТРИПЛЕТІВ**

01.04.16 — фізика ядра і елементарних частинок

Автореферат
дисертації на одбуття наукового ступеня
кандидата фізико - математичних наук

Харків — 1997

539.1

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00751762 (S)

Дисертація є рукопис

Роботу виконано у ННЦ "Харківський фізико - технічний інститут"

Наукові керівники: доктор фізико - математичних наук

Колесников Леонід Якович

кандидат фізико - математичних наук

Болдишев Валентин Федорович

Офіційні опоненти: доктор фізико - математичних наук

Шульга Микола Федорович

доктор фізико - математичних наук

Карнаухов Іван Михайлович

Провідна організація:

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

Захист відбудеться "21" листопада 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 "10" жовтня 1997р.

Вчений секретар Спеціалізованої ради

доктор фізико - математичних наук,

професор

М.О. Аваренков Аваренков 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 можливі пучки поляризованих фотонів з енергіями ω до сотен Гев ($\hbar=c=1$). Застосування цих пучків вимагає ретельного опанування величини їх поляризації.

Перерію вихода часток із процесів, що викликаються лінійно поляризованими фотонами, має вигляд:

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

де σ^t - перерію процесів на неполяризованих фотонах, P - ступень лінійної поляризації фотонного пучка; σ^l - частина перерію, що обумовлена поляризацією фотонів, $\Lambda = \sigma^l/\sigma^t$ - асиметрія вихода продуктів реакції при певній поляризації фотонного пучка ($P = 1$), яка часто називається аналізуючою спроможністю, φ - азимутальний кут, що відраховується від площини поляризації фотонів. У випадку аморфного конвертора це азимутальний кут площини реєстрації продуктів реакції; у випадку кристалічного конвертора це азимутальний кут площини, в якій містяться імпульс фотона k і вектор оберненої решітки кристала b_1 .

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

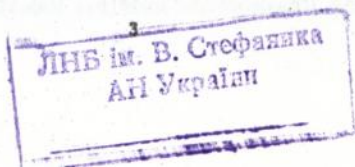
При ω , більших декількох десятків МеВ, для вимірювання поляризації фотонів перспективні процеси народження e^+e^- - пар на ядрах і спектрах



Їх перерію порядку мбн. З ростом ω вони ростуть.

Можливості процесів (2) в аморфному конверторі обмежені $\omega < 1\text{Гев}$. Когерентний ефект дозволяє використовувати монокристали при $\omega > 1\text{Гев}$. У випадку тонкого кристала його можливості обмежені $\omega < 40\text{Гев}$; метод селективного поглинання фотонів в товстих монокристалах ефективний при ω , більших десятків Гев.

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. Другий випадок, що дозволяє одержати спектр поляризації, пов'язаний 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 визначити їх азимутальний кут φ_1 . Частина таких електронів слабо змінюється з ростом ω . У зв'язку з тим, що в кінцевому стані процесу (3) три частки, що можуть релаксуватися, цей процес називають процесом народження триплетів.

У нижчому порядку теорії обуджень процес (3) описується 8 діаграмами Фейнмана. При $\omega > 16mc^2 [23,8]$ так звані діаграми Борселіно, що дають основний вклад у перерію, забезпечують точність повного перерію $\sim 1\%$. Дослідження з урахуванням діаграм Борселіно перерію $d\sigma/d\varphi_1$ в інтервалі $20mc^2 \leq \omega \leq 1000mc^2$ і перерію $d\sigma/d\varphi_1(q_0)$ народження триплетів $q \geq q_0$ в інтервалах $100mc^2 \leq \omega \leq 1000mc^2$ і $0,05MeB/c \leq q_0 \leq 1,25MeB/c$ в роботах Боднишева і Пересунько [21,22] і перерію $d^2\sigma_e/d\varphi_1 dq$, $d\sigma_e/d\varphi_1(q_0)$, $d\sigma_e/d\varphi_1$, $d\sigma_e/d\varphi_1 d\Theta_1$, $d\sigma_e/d\varphi_1 dx$ ($x = E_+/E_0$ — частина енергії, що уносить позитрон), одержаних в роботах [1,3] в асимптотичних границях високих енергій показали, що вихід електронів віддачі із процесу (3) має азимутальну асиметрію, чутливу до лінійної поляризації фотонів. Всі асимптотичні перерію, крім $d\sigma_e/d\varphi_1$, не залежать від ω . З ростом ω значення частин і асиметрій точних перерію наближаються до асимптотичних. При $\omega = 1000mc^2$ точні величини відрізняються від асимптотичних не більше, ніж на 10%. Значення перерію $\sim mB$ і асиметрії, більші 0,11, показують, що метод асиметрії електронів віддачі із процесу (3) не має верхньої границі використання. Тому дослідження процесу народження триплетів лінійно поляризованими фотонами і розробка на його основі метода вимірювання лінійної поляризації фотонних пучків надзвичайно актуальні.

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

Наукова новизна роботи.

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

1) Вперше вивчені і досліджені залежності диференціальних перерію народження триплетів, що враховують діаграми Борселіно, $d^2\sigma/d\varphi_1 dq d\Theta_1$, $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Delta$, $d^2\sigma/d\varphi_1 dq$, $d\sigma/d\varphi_1$, перерію, проінтегрованих 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 перерію, одержаних на асимптотичній границі високих енергій фотонів $d^2\sigma_e/d\varphi_1 dq$, $d\sigma_e/d\varphi_1(q_0)$, $d\sigma_e/d\varphi_1$, $d^2\sigma_e/d\varphi_1 d\Theta_1$, $d^2\sigma_e/d\varphi_1 dx(q_0)$ 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). Розширені інтервали вимірювання і дослідження перерізів $d\sigma/d\varphi_1$ і $d\sigma/d\varphi_1(q_0)$. Проведене порівняння значень частин і асиметрій асимптотичних перерізів із значеннями відповідних величин точних перерізів.

2) Визначені оптимальні інтервали змінних для проведення експеримента по вимірюванню лінійної поляризації фотонних пучків.

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

4) З допомогою стримерної камери СК-600, заповненої гелієм, вперше розробленим методом виміряна лінійна поляризація фотонного пучка. Цим експериментально показано, що метод може використовуватись для вимірювання лінійної поляризації фотонних пучків.

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

Повоження, внесені на захист.

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

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

2) Аналіз вкладів у переріз неврахованих в діаграми і їх інтерференцій, кулоновських і радіаційних поправок, втягу електронів у атомі і обґрунтування можливості використовувати 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 вивчення і численого інтегрування перерізів народження триплетів лінійно поляризованими фотонами, вивчення різних диференціальних перерізів і аналіз їх залежності від ω , Δ , Θ_1 , q , q_0 , x в інтервалах $50mc^2 \leq \omega \leq 10000mc^2$, $2m \leq \Delta \leq 10m$, $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq \Theta_1 \leq \Theta_1(\omega, q)_{max}$, $0,02mc \leq q \leq 10mc$, $0,02mc \leq q_0 \leq 10mc$, пошуку оптимальних умов для вимірювання лінійної поляризації фотонних пучків.

4) Розробка алгоритма для отримання значення поляризації фотонного пучка по експериментальним даним, оцінки помилки експериментального значення поляризації і очікуваної точності вимірювання поляризації в експериментах, що плануються, розрахунки експериментів, аналіз експериментальних можливостей проанованого метода.

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

Апробація роботи і публікації.

Робота виконана у Харківському фізико - технічному інституті.

Основні результати роботи доповідались на Всесоюзних семінарах по електромагнітних взаємодіях адронів у Харкові, на Всесоюзній конференції по розробках і практичному використанню електронів (Томськ, 1975р), на конференції по ядерно - фізичним дослідженням, присвяченій 50 - річчю здійснення в СРСР реакції розщеплення атомного ядра (Харків, 1982р), на сесії відділення ядерної фізики АН СРСР (Москва, 1986р), на Єврофізичній конференції (Барі, 1985р), на V міжнародній нараді по спіновим явищам у фізиці високих енергій (Протвіно, 1993р), представлялись на конференції PANIC у Гейдельберзі у 1984 і 1986 рр. Матеріали дисертації надруковані у 20 роботах, список яких приведено в кінці автореферата.

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 метода вимірювання лінійної поляризації фотонних пучків за асиметрією електронів віддачі із процесу (3), ставиться задача по розробці метода і вимірюванню поляризації фотонного пучка, обґрунтовується актуальність досліджень, пов'язаних з розробкою метода і вимірюванням поляризації, відзначається повнота одержаних результатів, викладені основні положення, що виносяться на вахист.

В I главі розглянуті основні характеристики процесу народження триплетів неполяризованими фотонами. Розглянута кінематика процесу. Оцінюється вклад 6 неврахованих діаграм Фейнмана, кулоновських 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%. Кулоновська поправка при народженні триплетів значна у межах декількох КеВ від порога і є повністю неважливою, коли енергія фотонів вище порога на 1 МеВ ($\omega_{пор} = 4mc^2$). Урахування радіаційної поправки зводиться до множення на 1,01 перерізу, одержаного у нижчому порядку

теорії обуджень. При $q \geq q_0 > 1$ тс електрони атомів можна рахувати вільними. Результати експериментів по вимірюванню лінійної поляризації фотонних пучків при $\omega \geq 16\text{тс}^2$ можна описувати перерізами, що відповідають діаграмам Борселіно. Приводяться формули для різних диференціальних переріів народження триплетів лінійно поляризованими фотонами, які зараз існують. Із цих формул витікає, що переважний вихід електронів віддачі знаходиться у площині, перпендикулярній площині поляризації фотонів.

Очікувана помилка вимірювання поляризації в експерименті, що планується, $\Delta P_{\text{пол}}$, пропорційна [8,13,12,16,6] $N^{-1/2}(g)\Lambda^{-1}(g)$, де $N(g)$ — число зареєстрованих триплетів в параметрах, що попали у вибрану область в границю g . $N(g)$ пропорційно $\sigma^t(g)$ — перерізу, проінтегрованому по області змінних усередині g . Оптимальні умови експеримента по вимірюванню поляризації P витікає в аналізі 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 кінематичною 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 чутливіше метод при використуванні області g замість області g_{tot} .

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

Частини переріів $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Delta(q_0)$, $d^2\sigma/d\varphi_1 dq$, $d\sigma/d\varphi_1(q_0)$ і $d\sigma/d\varphi_1$ [5,12,16,6] в ростом ω ростуть швидко при малих енергіях фотонів і досить повільно при $\omega > 500\text{тс}^2$. Асиметрія переріва $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Delta(q_0)$ практично не залежить від ω ; асиметрії переріів $d^2\sigma/d\varphi_1 dq$, $d^2\sigma/d\varphi_1(q_0)$, і $d\sigma/d\varphi_1$ в ростом ω зменшуються.

В інтервалі ω , що досліджується, частини переріів $d^2\sigma/d\varphi_1 dq d\Theta_1$, $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ 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 $d^2\sigma/d\varphi_1 dq d\Theta_1$ і $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ і 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 порога частини цих переріїв швидко ростуть з ростом ω . Їх асиметрії наближаються до одиниці при наближенні ω до порога. З ростом ω біля порога асиметрії дуже швидко зменшуються.

Після максимумів частин характер залежності від ω частин і асиметрій переріїв $d^3\sigma/d\varphi_1 dq d\Theta_1$, $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ і $d^2\sigma/d\varphi d\Theta_1$ відривняється. Він належить від Θ_1 , а у випадку перших двох переріїв — від q і q_0 , відповідно. З ростом Θ_1 пороги і максимуми частин переміщуються у сторону більших ω , значення частин у максимумах ростуть.

У логарифмічному масштабі по осях координат зменшення з ростом ω частин перерію $d^3\sigma/d\varphi_1 dq d\Theta_1$ після максимумів близьке до лінійного. Його асиметрія після крутого спаду біля порога повільно зменшується з ростом ω до величин, близької до нуля. При малих q_0 залежності частин перерію $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ від ω мають широкі максимуми. З ростом q_0 максимуми частин в залежності від ω розширяються і при наближенні до верхньої границі при заданих ω і Θ_1 , $q(\omega, \Theta_1)_{\text{max}}$ зникають. В області великих ω залежності частин і асиметрій переріїв $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ і $d\sigma/d\varphi d\Theta_1$ від енергії фотонів мають тенденцію вийти на плато. Асиметрія в області плато 10 — 20%.

Із характеру залежності від ω частин і асиметрій ріонних диференціальних переріїв витікає, що у досить широкому інтервалі ω характер залежності частин і асиметрій досліджуваних переріїв від Δ , q, q_0 і Θ_1 не змінюється із зміною енергії фотонів. З ростом ω частин і асиметрій переріїв $d^2\sigma/d\varphi_1 dq, d\sigma/d\varphi_1(q_0)$, $d\sigma/d\varphi_1$ і $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ наближаються до значень відповідних частин і асиметрій переріїв $d^2\sigma_a/d\varphi_1 dq$, $d\sigma_a/d\varphi_1(q_0)$, $d\sigma_a/d\varphi_1$ і $d^2\sigma_a/d\varphi_1 d\Theta_1$. При $\omega = 10000mc^2$ точні величини відривняються 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 переріїв $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Delta(q_0)$, $d^2\sigma/d\varphi_1 dq$, $d\sigma/d\varphi_1(q_0)$, $d^2\sigma_a/d\varphi_1 dx(q_0)$ [10,5,12,16,6] швидко зменшуються з ростом q і q_0 , відповідно. Асиметрія перерію $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Delta(q_0)$ росте з ростом q_0 у відміну від асиметрій інших переріїв цієї групи, які зменшуються з ростом q і q_0 . Перерію $d\sigma_a^i/dq$ і $d\sigma^i/dq$ добре угоджуються з експериментальними розподілами по q .

При заданих ω і Θ_1 залежності від q частин перерію $d^3\sigma/d\varphi dq d\Theta_1$ [6] мають максимуми поблизу нижньої і верхньої границь $q(\omega, \Theta_1)_{\text{min}}$ і $q(\omega, \Theta_1)_{\text{max}}$ допустимих значень q , між якими знаходяться мінімуми. Асиметрія цього перерію має мінімуми у точках мінімумів його частин. При наближенні q до границь вона наближається до одиниці. З ростом ω і зменшенням Θ_1 інтервал значень q розширяється. Із зменшенням Θ_1 она-

чення частин у максимумах і мінімумах зменшуються. З ростом 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 $2m \cos \Theta_1 / \sin^2 \Theta_1$, зміщення правих максимумів при $\omega > 500mc^2$ незначне.

Біля границь частини перерізу $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ [6] швидко зменшуються з ростом q_0 . При $q_0 \rightarrow q(\omega, \Theta_1)_{\max}$ $\Lambda(q_0) \rightarrow 1$. Біля $q(\omega, \Theta_1)_{\max}$ у залежності від q_0 частин і асиметрії проявляється плато. Ширина його росте з ростом 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 . З ростом q_0 значення частин швидко зменшуються, їх максимуми стають більш широкими і переміщуються у сторону більших Δ . Асиметрія з ростом Δ швидко зменшується. При $\Delta \rightarrow 2m$ вона наближається до одиниці.

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

В залежності від Θ_1 [12,16,6] частини і асиметрії перерівів $d^3\sigma/d\varphi_1 dq d\Theta_1$, $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ і $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1$ [12,16,6] ростуть з ростом 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 $d^2\sigma/d\varphi_1$ частини перерівів 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 ростуть з ростом Θ_1 . В цій області Θ_1 асиметрія переріва $d^3\sigma/d\varphi_1 dq d\Theta_1$ порядку десятків процентів, а асиметрії перерівів $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ і $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1$ порядку 10 - 12 %. З ростом 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 асиметрій зміщуються в сторону більших Θ_1 . В широкій області Θ_1 частини і асиметрії переріва $d^2\sigma/d\varphi_1 d\Theta_1(q_0)$ не залежить від q_0 . При $\omega > 200mc^2$ їх залежності від Θ_1 практично не змінюються з ростом ω . При $\omega = 10000mc^2$ його частини і асиметрії відрізняються від асимптотичних не більше, ніж на 5 %. Переріви $d\sigma'/d\Theta_1$ і $d\sigma'_a/d\Theta_1$ угоджуються [17,7,6] з експериментальними розподілами по Θ_1 при $\Theta_1 \leq 55^\circ$. Поведінка експериментальних розподілів по Θ_1 вимагає ретельних теоретичних досліджень.

Із результатів проведеного аналізу витікає [12,16,6], що для оптимізації вимірювання ступеня лінійної поляризації фотонного пучка P — досягнення максимальної точності при мінімальній статистиці — необхідно

при вимірюваннях відбирати випадки: 1) починаючи з можливо меншого імпульса електронів віддачі; 2) близькі до симетричних по розподілу енергій електронів і позитронів пари, $z = 0,5$; 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 пошуриною $\varphi_{10} = 33,4^\circ$.

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

На границі області допустимих 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 з $q \geq q_0$. Вимірюючи $\omega, q = |p_1|$ і Θ_1 або величини імпульсів e^+ і e^- , p_+ , p_- і кут між ними Θ_{+-} , можна, користуючись виразами

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

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

відбирати випадки з Δ в інтервалі

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

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 отримується після довгої процедури обробки. Проанований метод абсолютний і в цьому випадку дозволяє калібрувати неабсолютні методи, які можуть забезпечити оперативне моніторування.

Застосування швидкодіючих детекторів полегшує набір статистики, дозволяє оптимізувати умови експеримента, спрощує процес і скорочує час отримання потрібної інформації. При цьому може використовуватись частина області $q \geq q_0$. Для вимірювання поляризації розумні дві можливості 1) відбирати випадки в вузькій області значень q і Θ_1 поблизу границі і 2) відбирати випадки в широкій області q і Θ_1 .

При використанні (7) відносна помилка $\delta\Delta/\Delta \sim 1\%$ досягається при $\Delta\omega/\omega \approx 0,01$, $\Delta p/p \approx 0,01/\omega$, $\Delta\Theta \sim 0,01\sqrt{2}/\omega$. 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 із інтервала (9). В аналізаторі лінійної поляризації, розробленому у Майнці [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 збереження високого значення Λ треба з ростом ω зменшувати Θ_{+-} , а це може обмежити можливості метода. Із аналізу розподілу по z витікає, що навіть при дуже високих енергіях фотонів у цього прилада може бути $\Lambda \approx 0,25$.

Поляриметр у Токіо [25,6] побудований із скінцилляторів. Використовується друга можливість. Електрони віддачі в q в інтервалі $1,9 \text{ MeV/c} \leq q \leq 10 \text{ MeV/c}$ реєструють 5 ідентичних телескопів 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 встановлені під кутом φ_1 , рівними $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ і 270° . Фрагменти пар реєструються телескопом лічильників P_1 і P_2 .

Для в'ясування можливостей цього прилада і розробленого метода вчислені [16,18,6] частини і асиметрії періода $d\sigma/d\varphi_1(\Theta_{10}, \Theta_{11}, p_{10}, p_{11})$ 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 періоду повільно зростають, а асиметрія повільно зменшується з ростом ω . В інтервалі $600 - 10000 \text{ MeV}$ асиметрія практично не змінюється і дорівнює $0,12$. При $P = 0,6$ і $\Lambda = 0,12$ отчується відносна помилка вимірювання

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

де N_T — число фотонів в потрібную енергією, що попадають на мішень за 1 сек, T — час експозиції.

Аналіз показав [16,6], що цей поляриметр, а значить і метод, може працювати як абсолютний монітор поляризації, що оперативно видає відомості про величину і напрямки вектора поляризації. Якщо фрагменти пар при високих енергіях фотонів аналізуються по енергії, то при використанні симетричного відносно $x = 0,5$ інтервала в ширину $u = x_1 - x_0 = 0,4$ забезпечується та же 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 інтервала ($u = 1$).

З допомогою стріменної камери СК - 600 в розмірами $600 \times 600 \times 120 \text{ мм}$, заповненої гелієм, проведено експеримент [17,6,7] по вимірюванню запропонованим методом лінійної поляризації пучка КГВ 600 MeV електронів ЛПЕ - 2000 в енергією фотонів в когерентному максимумі 60 MeV .

Набрано біля 8000 стереофотографій. Пройшло обробку 307 випадків. В області когерентного максимуму ($45 \text{ MeV} \leq \omega \leq 75 \text{ MeV}$) отримано 118 випадків. По даним цих випадків побудовані розподіли триплетів по ω , спектр інтенсивності пучка фотонів $I(\omega)$, що вийшов із кристала алмаза,

розподіли триплетів по імпульсу q , полярному Θ_1 і азимутальному φ_1 куту електронів віддачі.

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

Розподіли триплетів по ω , спектри інтенсивності і енергетичний спектр поляризації фотонів [17,7] мають максимуми при $\omega = 60$ MeV. Поляризація в максимумі $P_{max} = 0,712 \pm 0,15$. Її 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 в усіма ω і випадків в ω в інтервалі $45\text{MeV} \leq \omega \leq 75\text{MeV}$ узгоджуються [17,7] в розподілом $d\sigma^t/dq$ при $\omega = 100mc^2$. Розподіли по Θ_1 [17,7] в цих інтервалах ω узгоджуються в експериментальними розподілами і в перерівах $d\sigma^t/d\Theta_1$ і $d\sigma^t/d\Theta_1$ в інтервалі $\Theta_1 < 50^\circ$ у випадку явищ в усіма ω і в інтервалі $\Theta_1 < 60^\circ$ у випадку явищ в області когерентного максимуму. Таким чином, наші експериментальні розподіли свідчать про правильність 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 $45\text{MeV} \leq \omega \leq 75$ MeV. При використанні метода асиметрії відбирались випадки в 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, перпендикулярної площини поляризації. Числа випадків $N_{||} = 22$ і $N_{\perp} = 27$ дають

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

Для визначення поляризації за методами максимуму правдоподібності (ММП) і найменших квадратів (МНК) використовувались два набори випадків: 1) випадки в усіма Θ_1 і 2) випадки в $\Theta_1 \leq 60^\circ$. Для цих наборів одержані значення: по методу МНК

$$P = 0,53 \pm 0,45 \quad ; \quad P = 0,59 \pm 0,83,$$

по методу ММП

$$P = 0,66 \pm 0,54 \quad ; \quad P = 0,66 \pm 1,18.$$

Ми бачимо, що всі 5 значень поляризації, отримані на основі метода асиметрії електронів віддачі триплетів, узгоджуються із значенням $P(45,75) = 0,66 \pm 0,15$, отриманим на основі теорії КГВ. Великі помилки вимірювання істотні і пов'язані з малою статистикою. Роорачунок показав, що для забезпечення точності $\sim 10\%$ потрібно 10000 випадків. Одержані значення поляризації показують можливість використовувати для її вимірювання метода асиметрії електронів віддачі. Результати експеримента у Токіо [26] підтверджують життєздатність метода асиметрії електронів віддачі.

У Висновках сформульовані основні результати роботи:

1. Вперше розроблено метод вимірювання ступеня лінійної поляризації фотонних пучків за азимутальною асиметрією вихода електронів віддачі із процесу (3). При розробці метода виконані роботи:

1. Досліджена кінематика процесу народження триплетів. Визначені області і інтервали допустимих значень кінематичних параметрів часток кінцевого стану.

2. Обоснована можливість використання для розробки метода вимірювання лінійної поляризації фотонів диференціальних перерізів, що враховують тільки діаграми Борселіно.

3. Вперше проведено аналіз рівних диференціальних перерізів народження триплетів лінійно поляризованими фотонами. Знайдено, що в досліджуваних інтервалах омієних величина перерізу порядку мбн, величина асиметрії омієється 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 вжогачати площину вильота електрона віддачі. З ростом 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 угоджуються з експериментальними і теоретичними розподілами, що є в літературі.

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

5. Проаналізовані експериментальні можливості розробленого метода вимірювання лінійної поляризації фотонних пучків. Показано, що він найбільш перспективний із 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 асиметрії електронів віддачі виміряна лінійна поляризація пучка фотонів. Результати цього експеримента підтверджують можливості використання метода. Основні результати дисертації опубліковані у таких роботах:

Література

- [1] Влокуров Е.А., Кураев Э.А. Об образовании триплетов поляризованных фотонов. ЖЭТФ, 1972, т.63, вып.4(10), ст.1142-1150.
- [2] Влокуров Е.А., Кураев Э.А., Меренков Н.П. Радиационные процессы образования e^+e^- - пары фотоном высокой энергии на электроне и на ядре. ЖЭТФ, 1974, т.66, вып.6, ст.1916-1925.

- [3] *Винокуров Е.А., Мсренков 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., Мсренков 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., Пересунько 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., Пересунько 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 получения 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 литература
- [21] Болдышев В.Ф., Пересунько Ю.П. Фотообразование электронно - позитронных пар на электронах и анализ поляризации фотонных пучков. ЯФ, 1971, т.14, вып.5, ст. 1027-1032.

- [22] *Боддышев В.Ф., Пересулько 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., Tobiayama 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 поляриного 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 трековых 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 candidat 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 condition 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.

Підписано до друку 26.06.97. Формат 60x84/16. Офсетний друк.
Умовних друкованих аркушів 1,0. Тираж 100. Замовлення 67.

Харків-310109, ринципінг ІІІІ ХГГГ

AB 38.639