

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРА С КОНВЕРТЕРОМ ИЗ ОРИЕНТИРОВАННОГО КРИСТАЛЛА

© 2024 г. В. А. Басков^{a, *}

^aФизический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

*e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru

Поступила в редакцию 11.03.2024 г.

После доработки 02.05.2024 г.

Принята к публикации 06.06.2024 г.

Ориентированный вдоль оси монокристаллический конвертер, находящийся перед электромагнитным спектрометром, меняет отклик спектрометра, регистрирующего электроны с энергиями в десятки ГэВ. При энергии электронов 26 и 28 ГэВ в зависимости от ориентации, толщины, типа кристаллического конвертора и толщины спектрометра относительное энергетическое разрешение спектрометра улучшается на величину от 15% до 80%.

DOI: 10.31857/S0032816224050042 EDN: EUCUVM

1. ВЕДЕНИЕ

При взаимодействии γ -квантов, электронов и позитронов с энергией $E > 100$ МэВ с кристаллом в широком интервале углов входа частиц относительно кристаллографической оси (плоскости) $\Theta \sim V/m \cdot c^2$ (V – масштаб потенциала оси или плоскости, m – масса электрона, c – скорость света) на длине формирования процессов излучения электроном (позитроном) и рождения e^+e^- -пар γ -квантом в кристалле $l \gg a$ (где a – постоянная решетки) оказывается большое число ядер. Когерентное взаимодействие частиц с этой совокупностью ядер приводит к значительному увеличению вероятности процессов и в конечном счете приводит к развитию аномальных электромагнитных ливней [1–3].

Особенно сильный эффект при входе частиц в кристалл с энергиями в десятки ГэВ возникает при углах $\Theta \ll V/m \cdot c^2$ [2]. В этой области углов частица взаимодействует с полем не отдельных атомов или группой атомов, а практически со всей совокупностью атомов оси (плоскости) кристалла. Начинает работать механизм постоянного сильного поля (ПСП),

приводящий еще к более значительному росту сечений электродинамических процессов [1, 2].

Отличие электромагнитного ливня, развивающегося в поле оси или плоскости ориентированного кристалла (кристалл считается ориентированным, когда $\Theta \approx 0$, где Θ – угол между импульсом γ -кванта, электрона или позитрона и осью (плоскостью) кристалла, относительно которой происходит ориентация) от стандартного электромагнитного ливня заключается в изменении практически всех параметров ливня: числе заряженных и незаряженных частиц, величинах радиационных длин, наличием температурной и ориентационной зависимостей и т.д., что ведет к изменению отклика спектрометра, регистрирующего этот ливень [4–7].

2. СПЕКТРОМЕТР НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

Важным результатом, выходящим из теории и экспериментальных исследований, явилась возможность использования аномальных ливней в ориентированных кристаллах в практической деятельности, а именно, в создании спектрометров направленного действия (СНД)

для применения в экспериментальной физике высоких энергий на ускорителях и космических исследованиях [2, 8–10].

Спектрометр направленного действия – это спектрометр полного поглощения, регистрирующий частицы в заданном направлении и представляющий из себя спектрометр с конвертером из ориентированного непрозрачного или прозрачного кристалла или спектрометр на основе непосредственно прозрачного кристалла (рис. 1а). Кристаллографическая ось конвертера или прозрачного кристалла-спектрометра направлена на источник частиц – на мишень или область взаимодействия в случае встречных пучков (рис. 1б).

В зависимости от целей установки и назначения, в которой используется СНД, в качестве

конвертера можно использовать непрозрачные кристаллы типа кремния (Si), германия (Ge), вольфрама (W) и прозрачные кристаллы типа вольфрамата (PbWO_4), граната ($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$) и т. д. [9].

Область работы СНД определяется шириной ориентационной зависимости $\Delta\Theta$ какого-либо параметра аномального ливня, например энергосыделения в детекторе, находящемся за кристаллом и регистрирующем ливень (рис. 2); $\Delta\Theta$ является полной шириной угловой зависимости энергосыделения в детекторе на половине разности между минимальным ($\Theta \gg 0$) и максимальным ($\Theta \approx 0$) энергосыделениями относительно нулевого угла ориентации кристалла. Экспериментально определено, что порядок значений $\Delta\Theta$ при энергиях электронов в десятки ГэВ и толщин кристаллов кремния

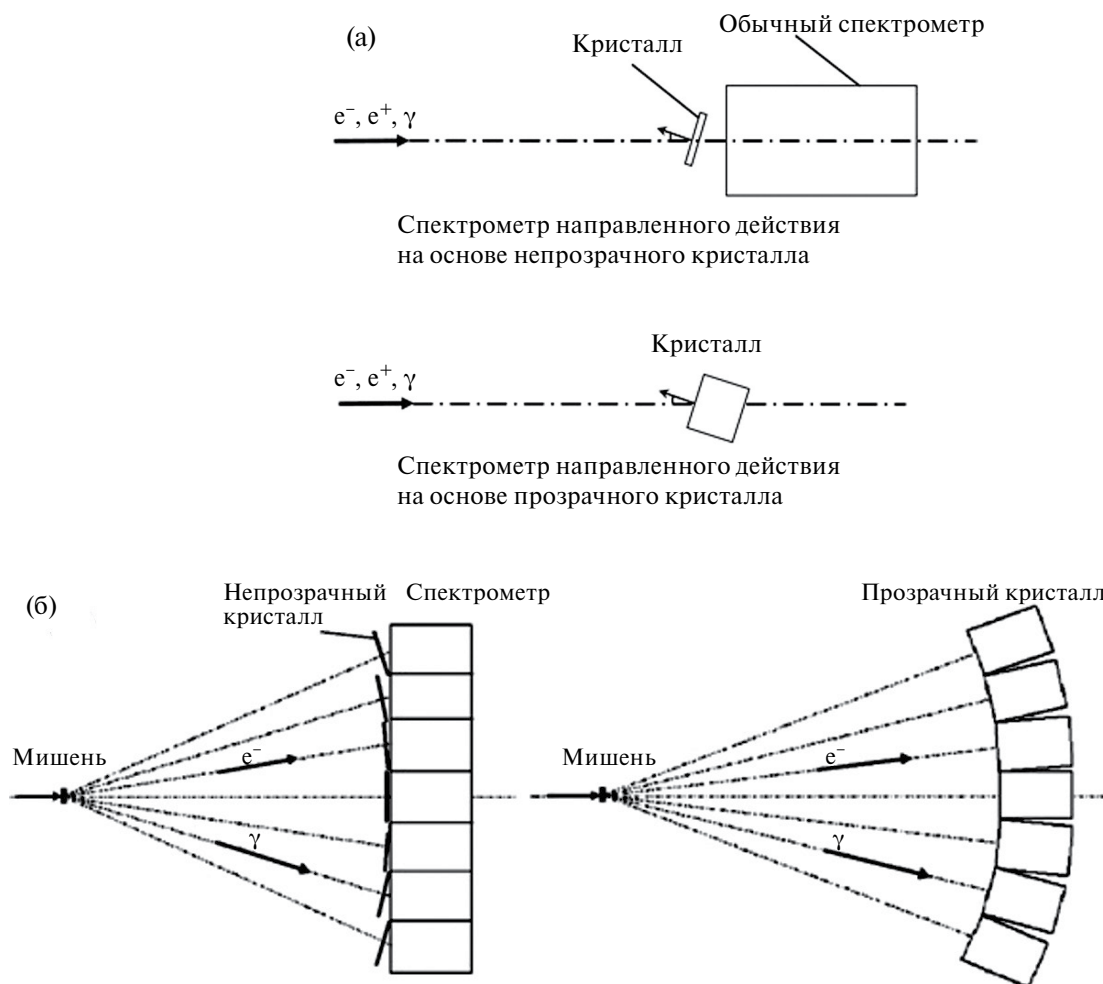


Рис. 1. Схема спектрометров направленного действия: **а** – регистрация e^- , e^+ , γ -квантов на основе ориентированных вдоль оси непрозрачных и прозрачных кристаллов, **б** – схема применения спектрометров направленного действия в экспериментальной установке.

и вольфрама $t_{\text{крист}} \sim 0.25X_0$ (X_0 – радиационная длина аморфного кристалла ($X_{0W} = 0.35$ см, $X_{0Si} = 9.4$ см)) будет составлять $\Delta\Theta_{Si} \sim 1$ мрад и $\Delta\Theta_W \sim 10$ мрад [4–10].

Из анализа сравнения существующих результатов по регистрации стандартным электромагнитным спектрометром аномальных и стандартных ливней можно сделать важное замечание, состоящее в том, что спектрометр, регистрирующий стандартные ливни, можно условно назвать пассивным спектрометром с характеристиками, заданными при проектировании, которые уточняются при тестированиях на пучках частиц. Относительно небольшое количество экспериментальных работ, в которых исследовались спектрометры с ориентированными конверторами, показывают, что система “ориентированный конвертор – спектрометр” является условно активным спектрометром, поскольку ориентированный конвертор оказывает значительное влияние на отклик и характеристики спектрометра. В отличие от отклика пассивного спектрометра, отклик активного спектрометра может меняться, уходя от конструктивно заданных параметров, при изменении параметров конвертора: типа, толщины, угла ориентации, температуры, потенциала оси ориентации [7].

В целом, можно считать, что пассивный спектрометр является частным случаем активного спектрометра при отсутствии или разориентации конвертора [4, 11, 12].

Поскольку ориентированный конвертор меняет отклик пассивного спектрометра на отклик активного спектрометра, то меняется и такая важная характеристика электромагнитного спектрометра, как энергетическое разрешение.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований энергетического разрешения электромагнитного спектрометра с ориентированным непрозрачным кристаллическим конвертором.

3. УСТАНОВКА “КАСКАД”

Работа была выполнена на установке “Каскад” на электронном канале ускорителя института физики высоких энергий (ИФВЭ, Протвино) в рамках программы изучения эффектов квантовой электродинамики в сильных полях ориентированных кристаллов [13].

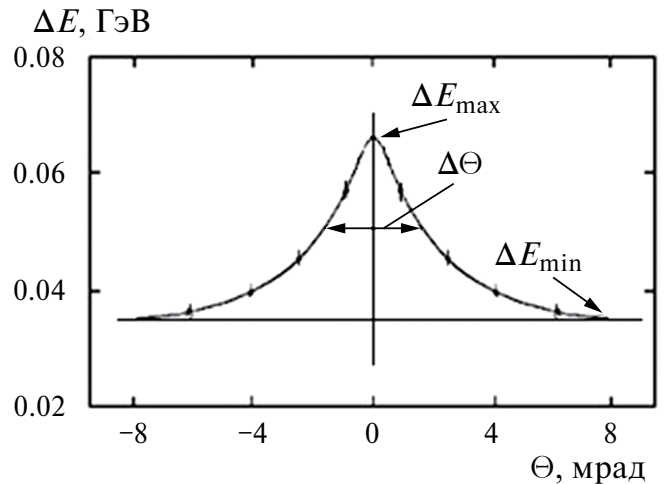


Рис. 2. Схема определения ширины ориентационной зависимости $\Delta Q_{\Delta E}$ энергосодержания электромагнитного ливня в черенковском счетчике толщиной $1X_0$, выходящего из кристалла вольфрама толщиной $t_W = 1$ мм: $E = 28$ ГэВ, $T_W = 77$ К, ось $\langle 111 \rangle$.

Схема экспериментальной установки “Каскад” представлена на рис. 3 [14]. В работе использовались непрозрачные конверторы из кристаллов вольфрама (W) диаметром 20 мм толщинами 1, 2.7, 5.8 и 8.4 мм и кристалла кремния (Si) толщиной 20 мм. Исследования проводились при комнатной температуре кристаллов $T_1 = 293$ К и температуре жидкого азота $T_2 = 77$ К. Ориентация кристаллов вольфрама происходила

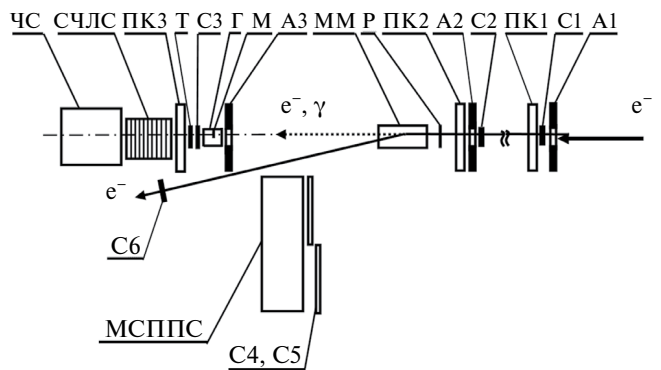


Рис. 3. Схема экспериментальной установки “Каскад”: А1–А3 и С1–С6 – сцинтилляционные счетчики, ПК1–ПК3 – пучковые пропорциональные камеры, Р – радиатор, ММ – магнит системы меченя фотонов, Г – гониометр, М – кристаллический конвертор, Т – сцинтилляционный счетчик для регистрации заряженных частиц ливня, СЧЛС – составной черенковский ливневый спектрометр, ЧС – черенковский спектрометр; МСППС – многоканальный свинцово-сцинтилляционный спектрометр полного поглощения.

вдоль кристаллографической оси $\langle 111 \rangle$, кристалла кремния вдоль оси $\langle 110 \rangle$. Разориентированным или аморфным считался кристалл, ось которого была повернута относительно импульса пучка электронов в сторону от кристаллографической оси на углы $\Theta_w > 20$ мрад и $\Theta_{Si} > 4$ мрад. Мозаичность кристаллов вольфрама и кремния составляла $\Delta\Theta_{Mw} = 1$ мрад и $\Delta\Theta_{MSi} < 0.5$ мрад. В эксперименте использовались пучки электронов с энергиями $E = 26, 28$ и 31 ГэВ с импульсным разбросом 0.76 ГэВ/с и расходимостью $|\nu| \leq 0.1$ мрад. Диапазон энергий фотонных пучков составлял $3\text{--}28$ ГэВ.

Ливни, выходящие из кристалла, регистрировались составным черенковским ливневым спектрометром (СЧЛС), в котором по анализу формы каскадных и интегральных кривых определялись характеристики электромагнитных ливней [15].

СЧЛС состоял из 10 независимых светоизолированных счетчиков (радиаторов) из свинцового стекла ТФ1 (рис. 4а). Счетчики имели одинаковый размер 100×100 мм² и толщину $1X_0 = 25$ мм. Сигнал с каждого счетчика регистрировался фотоэлектронным умножителем ФЭУ-85.

Для сбора оставшейся части ливня за СЧЛС помещался черенковский спектрометр (ЧС)

толщиной $15X_0$ (рис. 4б). ЧС имел шестигранный радиатор из свинцового стекла ТФ1 с диаметром вписанной окружности 180 мм. Для снятия сигнала использовался ФЭУ-49-Б. ЧС также использовался для калибровки СЧЛС.

Конструкция последовательного расположения счетчиков СЧЛС и ЧС дала возможность в эксперименте и последующей обработке экспериментальных результатов суммировать сигналы отдельных счетчиков и формировать различные толщины спектрометра, находящегося за кристаллом, от $1X_0$ до $10X_0$ и толщину суммарного спектрометра СЧЛС+ЧС равную $25X_0$.

Калибровка СЧЛС и ЧС была проведена на пучках электронов с энергиями 26 и 28 ГэВ в два этапа [14,15]. На первом этапе была проведена калибровка ЧС, на втором этапе перед ЧС был помещен СЧЛС и прокалиброван суммарный спектрометр (ЧСПП+ЧС). При калибровке перед ЧСПП и перед суммарным спектрометром кристаллический конвертор отсутствовал.

4. КАСКАДНЫЕ КРИВЫЕ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЛИВНЕЙ

На рис. 5 приведены каскадные кривые развития электромагнитных ливней от электронов с энергией 26 ГэВ, выходящие из разориентированных (а) и ориентированных вдоль оси

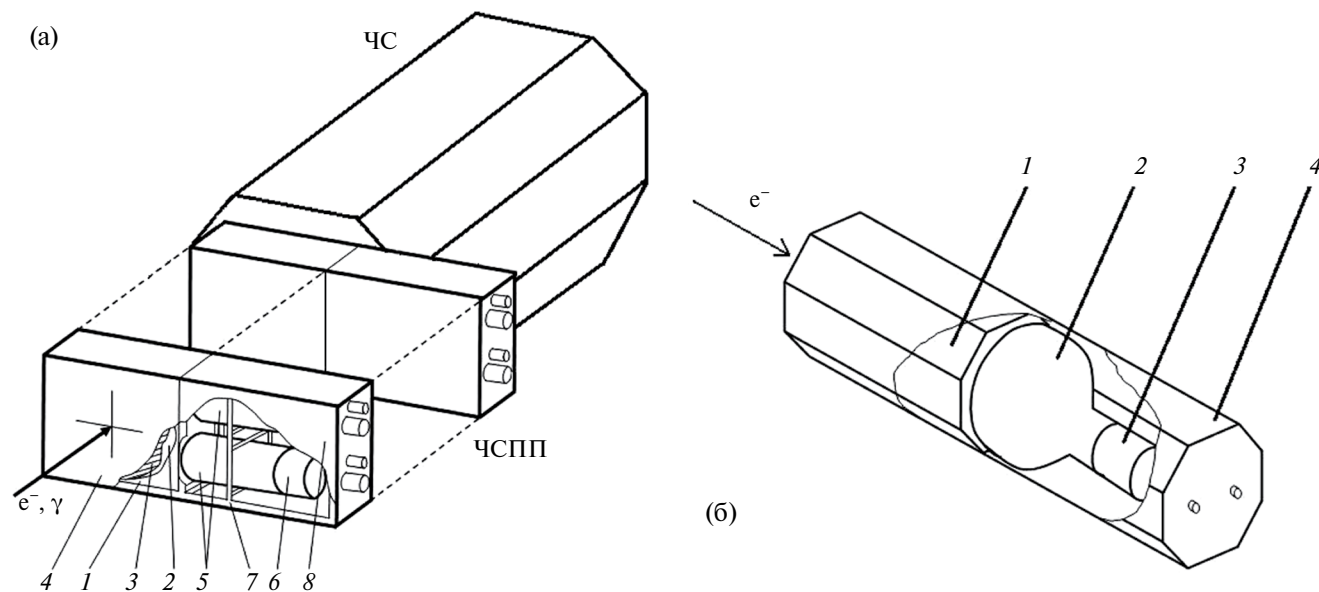


Рис. 4. а – Схема ЧСПП и расположения ЧСПП и ЧС на пучке: 1 – радиатор; 2 – алюминированный майлар, 3 – черная светонепроницаемая бумага, 4 – черная изоляционная лента, 5 – ФЭУ-85, 6 – делитель, 7 – крепления радиатора, ФЭУ и делителей, 8 – корпус. б – Схема ЧС: 1 – радиатор, 2 – ФЭУ-49, 3 – делитель, 4 – корпус.

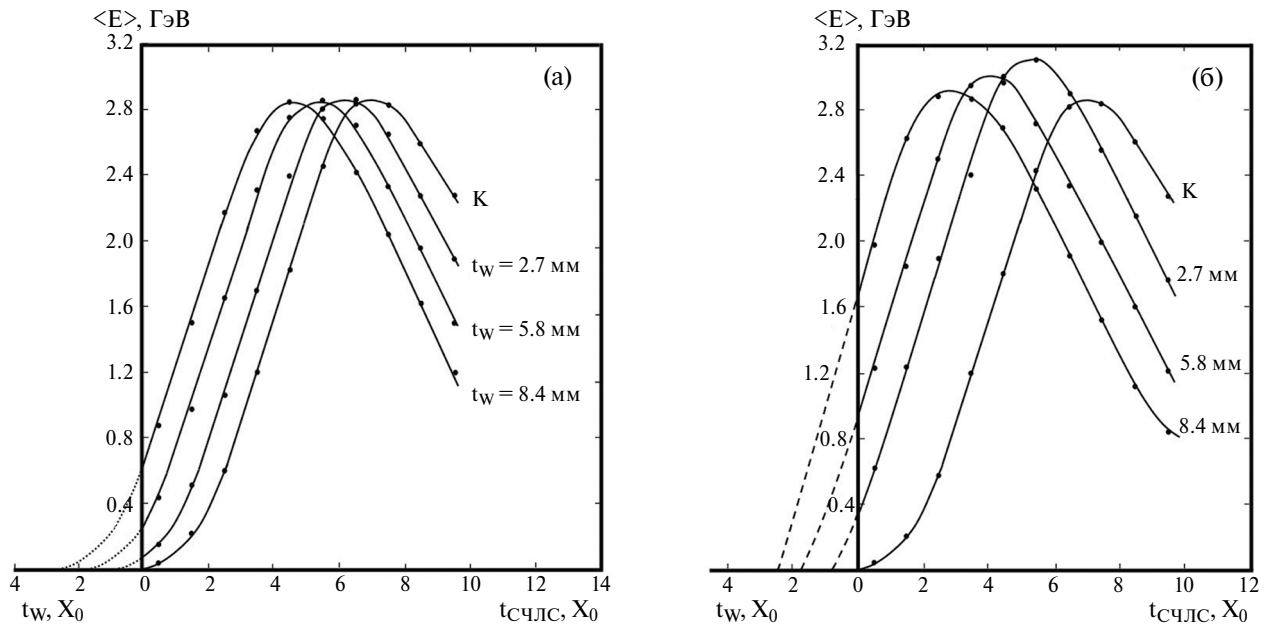


Рис. 5. Каскадные кривые развития электромагнитного ливня в СЧЛС от электронов с энергией $E_e = 26$ ГэВ в зависимости от толщины разориентированных (а) и ориентированных вдоль оси $\langle 111 \rangle$ (б) кристаллов вольфрама перед СЧЛС, K – калибровочная кривая (кристалл перед СЧЛС отсутствует).

$\langle 111 \rangle$ (б) кристаллов вольфрама 2.7, 5.8 и 8.4 мм при комнатной температуре $T_W = 293$ К, и далее продолжающих развиваться в СЧЛС [5]. На рисунке по оси абсцисс отложена толщина спектрометра СЧЛС ($t_{\text{СЧЛС}}$) в радиационных длинах, по оси ординат отложена средняя энергия ливня ($\langle \Delta E \rangle$), оставленная им в каждом счетчике спектрометра. Кривая K – калибровочная кривая, относится к отсутствию перед СЧЛС кристаллического конвертора. В этом случае начало развития ливня приходится на первый счетчик СЧЛС.

5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ

5.1. Среднеквадратичное разрешение

На рис. 6 показаны зависимости среднеквадратичного разрешения σ спектра энергосодержания ливня в счетчиках СЧЛС разной толщины и суммарного спектрометра ($\sigma = \text{FWHM}/2.35$, где FWHM – полная ширина на половине высоты спектра энергосодержания ливня в счетчиках, $2.35 = 2(\ln 2) \cdot \sqrt{2}$).

При разориентированном и ориентированном состояниях конвертора перед суммарным спектрометром поведение σ от толщины

спектрометра имеет качественно одинаковый характер развития ливня в СЧЛС, наблюдавшийся в [4]. Величина σ “тонкого” (2.7 мм) ориентированного конвертора в максимуме развития ливня при $t_{\text{СЧЛС}} \sim 5-8X_0$ изменилась несильно относительно разориентированного состояния. Однако в обоих случаях значения σ уменьшились примерно на 25% относительно значения, полученного при калибровке спектрометра (конвертор отсутствует). При ориентации “толстых” конверторов (5.8 и 8.4 мм) величина σ уменьшилась еще примерно на 35% и уменьшение в сумме для этих конверторов составило порядка 60% (рис. 5б). При толщинах СЧЛС $t_{\text{СЧЛС}} \geq 5-8X_0$ и ориентированном конверторе хорошо видна сильная зависимость σ от толщины конвертора.

На рис. 6а видно стандартное поведение зависимости σ от толщины разориентированного конвертора [16]. Иное поведение σ наблюдается при наличии ориентированного конвертора перед суммарным спектрометром (рис. 6б). Особенно значительные различия наблюдаются для “толстых” кристаллов 5.8 мм и 8.4 мм.

Действительно, при ориентации кристалла качественно меняется суть конвертора, так как он из пассивного элемента конструкции спектрометра переходит в активный. В пассивном

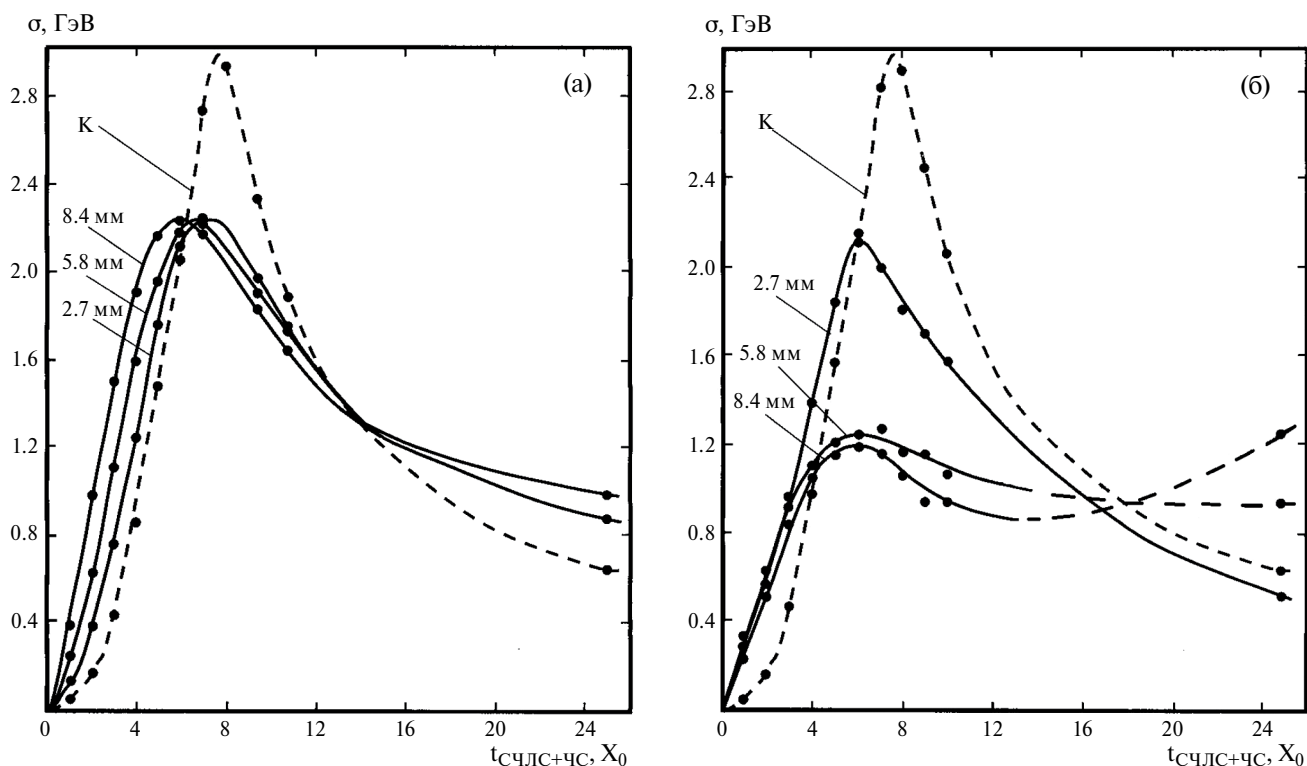


Рис. 6. Зависимость среднеквадратичного разрешения σ спектрометра СЧЛС+ЧС от его толщины $t_{\text{СЧЛС+ЧС}}$ и толщины разориентированного (а) и ориентированного вдоль оси $\langle 111 \rangle$ вольфрамового кристаллического конвертора (б); $E = 26$ ГэВ, $T_w = 293$ К, K – калибровка ($t_w = 0$), толщины кристаллов показаны слева от кривых.

конверторе флуктуации в веществе конвертора значительные и увеличиваются с толщиной конвертора (рис. 5а) [17]. Взаимодействие ливневых частиц с атомными ядрами, т.е. излучение электронов и рождение e^+e^- -пар γ -квантами происходит по стандартному механизму Бете–Гайтлера [1, 2].

Развитие аномального ливня в ориентированном конверторе с последующим выходом из конвертора и дальнейшим развитием в аморфном веществе спектрометра имеет более сложный характер. В активном конвертере ливень развивается в электромагнитном поле большого числа ядер, ливневые частицы когерентно взаимодействуют с атомными ядрами. В поле кристаллографической оси возникают также процессы каналирования ливневых частиц с последующим излучением электронами и позитронами и рождением e^+e^- -пар фотонами. По мере развития ливня из-за уменьшения энергии ливневых частиц возрастает процесс рассеяния заряженных частиц на атомах кристаллографической оси и выход части частиц за пределы области когерентного взаимодействия ливневых частиц с атомами оси (процесс

дезориентации). Вышедшие из области электромагнитного поля оси частицы снова начинают взаимодействовать с отдельными атомами. Однако из-за того же процесса рассеяния часть ливневых частиц обратно входит в область сильного осевого электромагнитного поля, продолжая процесс развития аномального ливня.

При выходе аномального ливня из кристалла его дальнейшее развитие продолжается, а аморфном веществе спектрометра с взаимодействием вторичных ливневых частиц уже с аморфным веществом. Однако эксперименты и рис. 5б и 6б показывают, что по выходу из кристалла аномальность ливня сохраняется. Особенно сильно отличие аномальных ливней от стандартных наблюдается при развитии ливня в “толстых” кристаллах 5.8 мм и 8.4 мм.

При таких толщинах кристаллов и $t_{\text{СЧЛС}} \approx 5-8X_0$ значения σ примерно на 45% меньше, чем при толщине кристалла $t_w = 2.7$ мм. Это означает, что число ливневых частиц значительно и величины флуктуаций меньше, чем в случае тонких кристаллов. Однако в области толщин СЧЛС, $t_{\text{СЧЛС}} > 8X_0$, зависимости σ

для всех трех исследованных толщин кристаллов существенно различаются. Это можно объяснить тем, что по мере увеличения толщины кристалла поглощение вторичных ливневых частиц значительное, что приводит к увеличению σ .

5.2. Относительное энергетическое разрешение

Относительное энергетическое разрешение СЧЛС и суммарного спектрометра (СЧЛС+ЧС) $\delta = \sigma/\Delta E$ (ΔE – доля энергии ливня, поглощенная спектрометром соответствующей толщины) в зависимости от толщины спектрометра и толщины кристалла, находящегося перед ним, при энергии электронов 26 ГэВ показано на рис. 7 и 8 соответственно [18].

При различных длинах спектрометра наблюдается существенное (в 2–5 раз) улучшение энергетического разрешения суммарного спектрометра по сравнению с разрешением спектрометра без кристалла и с разориентированным кристаллом.

6. ОПТИМАЛЬНАЯ ТОЛЩИНА КРИСТАЛЛА И СПЕКТРОМЕТРА

На рис. 8 видно, что при данной энергии пучка электронов при разориентированном и ориентированном состояниях конвертора существует некоторая оптимальная толщина кристалла ($t_{w\text{opt}}$), соответствующая оптимальной толщине спектрометра (t_{CCopt}), при которой относительное энергетическое разрешение спектрометра наилучшее $\delta = \delta_{\text{min}}$. На рис. 9 представлено соотношение оптимальных толщин кристаллического вольфрамового конвертора перед спектрометром ($t_{w\text{opt}}$) и толщин спектрометра (t_{CCopt}), при которых относительное энергетическое разрешение суммарного спектрометра наилучшее.

Этот эффект связан с двумя процессами. Первый – увеличение числа вторичных ливневых частиц при развитии ливня по мере увеличения толщины спектрометра и снижение относительной величины флуктуаций, второй – усиление процесса поглощения ливневых частиц и увеличение величины флуктуаций. При определенных толщинах конвертора и спектрометра наступает некоторое равновесие

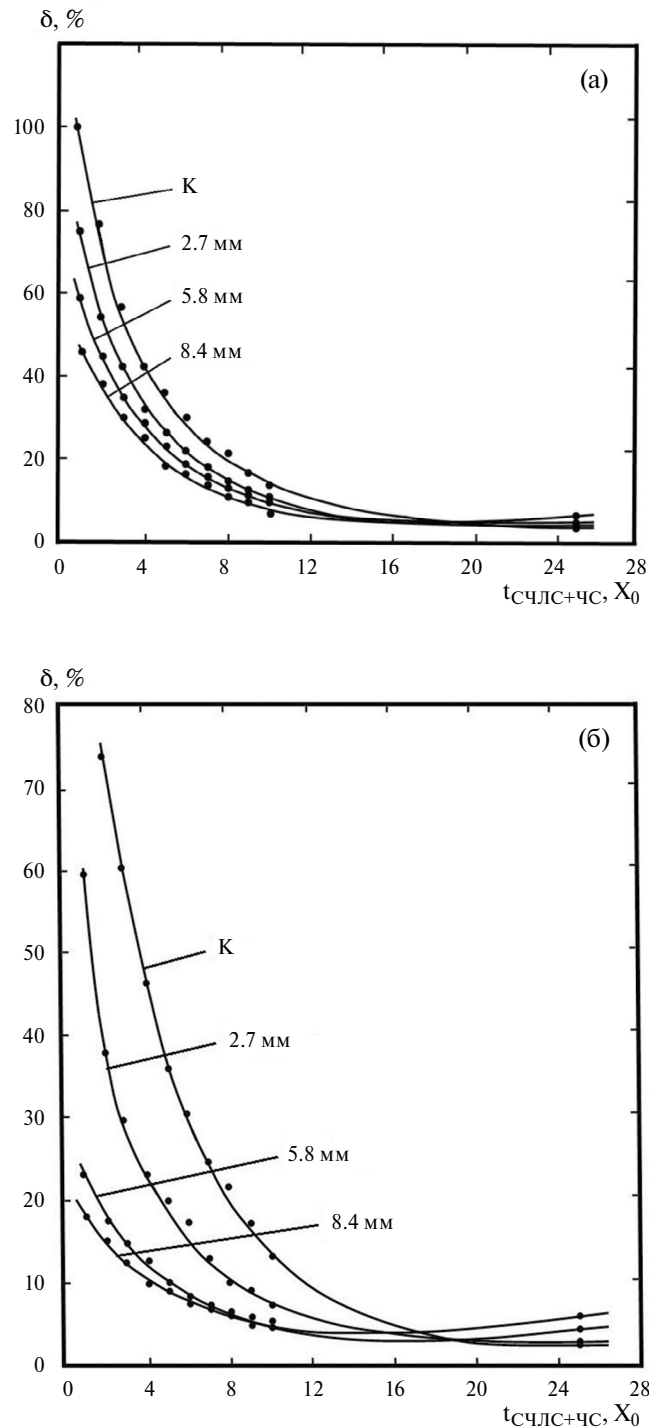


Рис. 7. Зависимость относительного энергетического разрешения суммарного спектрометра от его толщины t_{CC} при разориентированном (а) и ориентированном вдоль оси $\langle 111 \rangle$ вольфрамовом кристаллическом конверторе (б), $E = 26$ ГэВ, $T_w = 293$ К, K – калибровка ($t_w = 0$).

процессов, при котором относительное энергетическое разрешение спектрометра достигает оптимальной или наилучшей величины $\delta = \delta_{\text{min}}$.

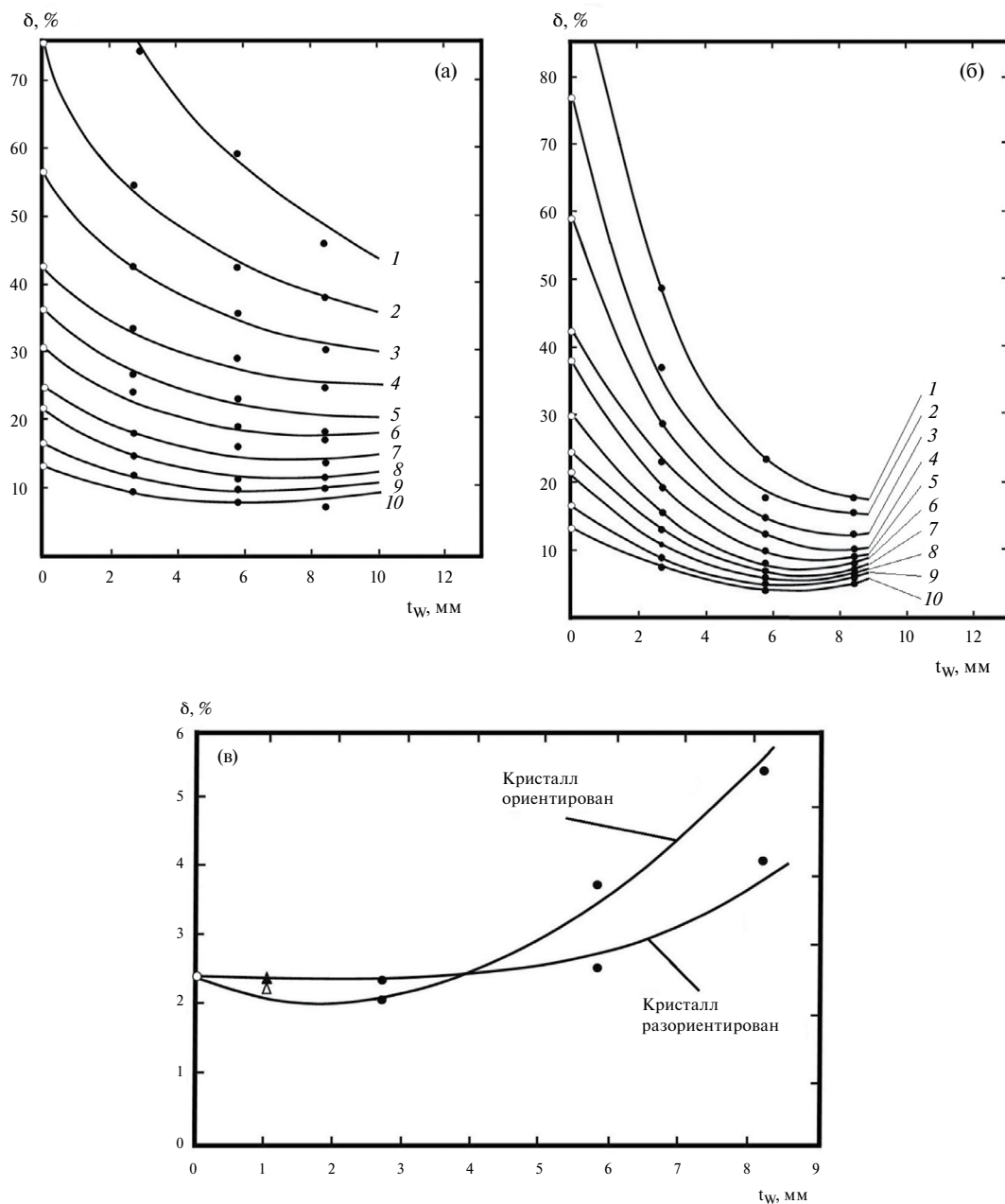


Рис. 8. Зависимость относительного энергетического разрешения суммарного спектрометра от толщины вольфрамового кристаллического конвертора t_w ; толщина спектрометра СЧЛС в радиационных длинах показана справа от кривых; $E = 26$ ГэВ, $\circ$ – калибровка, $\bullet$ – $t_w = 293$ К; $\blacktriangle$, Δ – $t_w = 77$ К: **а** – конвертор разориентирован, **б** – конвертор ориентирован вдоль оси $\langle 111 \rangle$, **в** – суммарный спектрометр ($t_{\text{СЧЛС}} + t_{\text{С}} = 25X_0$; $\blacktriangle$ и Δ – конвертор разориентирован и ориентирован вдоль оси $\langle 111 \rangle$ соответственно).

7. ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Поскольку параметры электромагнитного ливня, развивающегося в ориентированном монокристаллическом конверторе, и, соответственно, параметры отклика спектрометра зависят от степени ориентации

кристаллографической оси или плоскости конвертора относительно оси пучка электронов или γ -квантов [2, 3, 5, 10], то и δ также должна иметь ориентационную зависимость $\Delta\Theta_\delta$. Наличие ориентационной зависимости и ее ширины $\Delta\Theta_\delta$ является важным вопросом, поскольку остается интерес применения ориентированных кристаллов в экспериментальной технике [19, 20].

На рис. 10 показаны ориентационные зависимости δ при регистрации электромагнитных ливней первым счетчиком СЧЛС толщиной $1X_0$ для конверторов из кристаллов вольфрама ($\langle 111 \rangle$) (а) и кремния ($\langle 110 \rangle$) (б), полученные при энергии электронов 26 и 28 ГэВ.

Для обоих типов кристалла видно существенное уменьшение δ при уменьшении угла ориентации. С увеличением толщины кристалла δ также улучшается, но при этом увеличивается ширина ориентационной зависимости $\Delta\Theta_\delta$.

На рис. 10 видно, что при одинаковой энергии электронов δ в случае кристалла вольфрама несколько хуже, чем в случае кристалла кремния, даже с учетом существенно низкой температуры кристалла вольфрама, при которой δ должна быть еще меньше [21]. Этот эффект, возможно, связан с худшей степенью совершенства кристалла или мозаичностью вольфрама по сравнению с кристаллом кремния.

Зависимость $\Delta\Theta_\delta$ от толщины и типа кристалла при регистрации аномальных ливней первым счетчиком СЧЛС представлена на рис. 11. Видно, что зависимость линейная и ее можно описать простой формулой: $\Delta\Theta_\delta = \alpha \cdot t_w$, где t_w — толщина кристалла в радиационных длинах (t_w [радиационная длина] = t_w [мм]/ X_0 [мм]), α — коэффициент пропорциональности. В данном случае $\alpha = 12.5$ мрад/рад.длин. В общем случае ширина ориентационной зависимости зависит от энергии частиц ($\Delta\Theta \sim E^{-1/2}$ [22, 23]) и поэтому величина α также должна зависеть от энергии.

Более детально соотношение между δ и шириной ориентационной зависимости $\Delta\Theta_\delta$

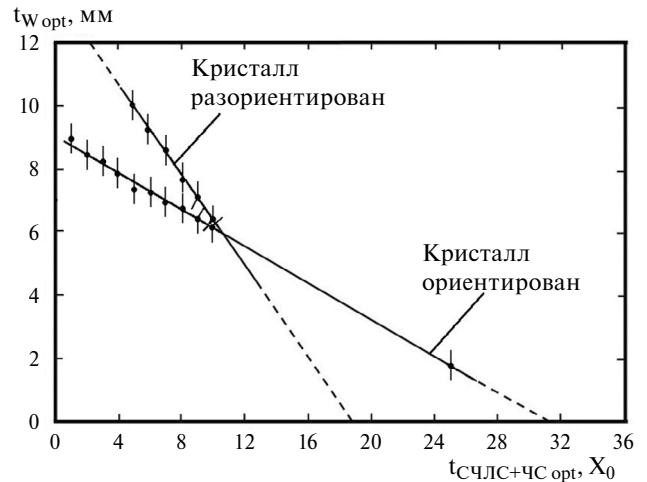


Рис. 9. Соотношение оптимальных толщин кристаллического вольфрамового конвертора перед суммарным спектрометром ($t_{w\text{ опт}}$) и толщин суммарного спектрометра ($t_{\text{СЧЛС+С}_\text{С}_\text{опт}}$), при которых относительное энергетическое разрешение суммарного спектрометра наилучшее.

кристаллов вольфрама и кремния показано на рис. 12. Действительно, δ улучшается с увеличением толщины кристалла и увеличением $\Delta\Theta_\delta$. Можно предположить, что по мере увеличения толщины кристалла увеличивается число вторичных ливневых частиц, приводящее к уменьшению числа флуктуаций. С другой стороны, увеличивается рассеяние ливневых частиц на атомных ядрах кристалла, приводящее к увеличению $\Delta\Theta_\delta$.

Надо отметить, что на рис. 5–8, 10 линии, описывающие экспериментальные результаты,

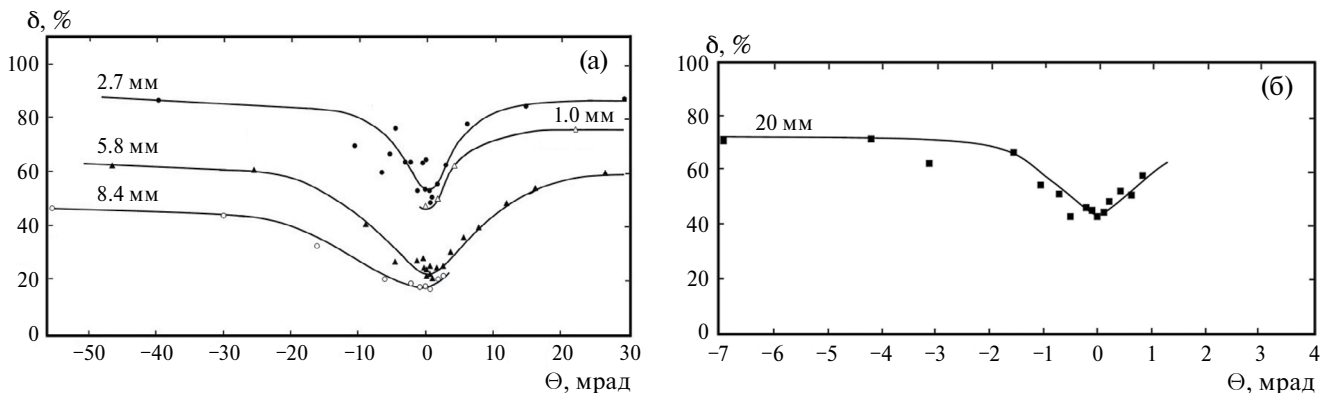


Рис. 10. Ориентационные зависимости относительного энергетического разрешения δ первого счетчика СЧЛС ($t_{\text{СЧЛС}} = 1X_0$) от толщины кристаллического конвертора: а — вольфрамовый конвертор ($\langle 111 \rangle$); б — кремневый конвертор ($\langle 110 \rangle$); •, ▲, ○ — $E = 26$ ГэВ; Δ, ■ — $E = 28$ ГэВ; Δ — $T = 77$ К; •, ▲, ○ — $T = 293$ К; толщины конверторов показаны над зависимостями.

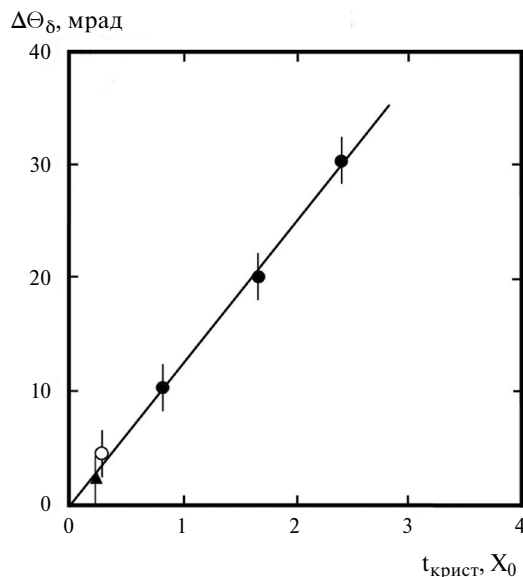


Рис. 11. Зависимость ширины ориентационной зависимости относительного энергетического разрешения $\Delta\Theta_\delta$ первого счетчика СЧЛС от толщины $t_{\text{крст}}$ кристаллов вольфрама ($\bullet$, $\circ$, $\langle 111 \rangle$) и кремния ($\blacktriangle$, $\triangle$, $\langle 110 \rangle$): $\bullet$ — $E = 26$ ГэВ, $T_W = 293$ К; $\circ$, $\blacktriangle$ — $E = 28$ ГэВ, $T_W = 77$ К, $T_{\text{Si}} = 293$ К.

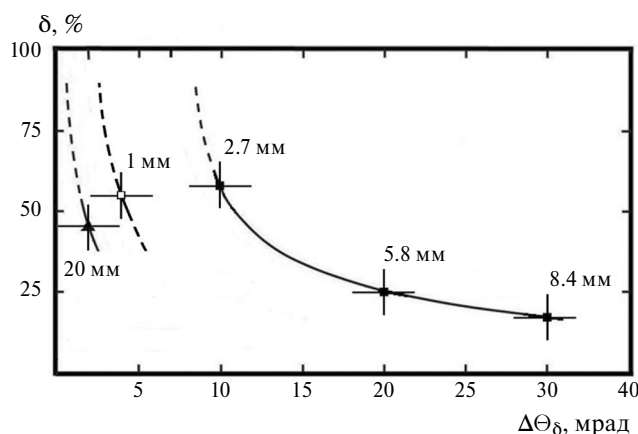


Рис. 12. Соотношение между относительным энергетическим разрешением δ первого счетчика СЧЛС и шириной ориентационной зависимости $\Delta\Theta_\delta$ кристаллов вольфрама ($\bullet$, $\circ$) и кремния ($\blacktriangle$, $\triangle$): $\bullet$ — $E = 26$ ГэВ, $T_W = 293$ К; $\circ$, $\blacktriangle$ — $E = 28$ ГэВ, $T_W = 77$ К, $T_{\text{Si}} = 293$ К; $\bullet$, $\circ$ — $\langle 111 \rangle$, $\blacktriangle$, $\triangle$ — $\langle 110 \rangle$.

проведены для наглядности. Погрешности значений энергетического разрешения определялись процедурой подгонки амплитудных спектров полиномом стандартной программы OriginPro 9.0 и составили 15–20% от значений величин, представленных на рисунках.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования энергетического разрешения электромагнитного спектрометра с конвертором из ориентированного кристаллического конвертора показывают, что:

- ориентированный кристаллический конвертор перед спектрометром влияет на энергетическое разрешение спектрометра в сторону его улучшения;

- для каждой толщины спектрометра существует толщина кристаллического конвертора, при котором его энергетическое разрешение наилучшее;

- ширина ориентационной зависимости относительного энергетического разрешения пропорциональна толщине кристаллического конвертора, коэффициент пропорциональности должен зависеть от энергии частиц;

- применение ориентированных конверторов предпочтительно при высоких энергиях, поскольку переводит обычный спектрометр в спектрометр направленного действия, что дает возможность уменьшить толщину спектрометра и улучшить его энергетическое разрешение.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность Е.И. Тамму и Е.И. Малиновскому за поддержку работы; В.И. Сергиенко за практическое руководство; В.В. Ким и В.А. Хабло, а также Б.И. Лучкову (НИЯУ МИФИ) и В.Ю. Тугаенко (РКК “Энергия”) за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Uggerhoj U.I.* // Reviews of Modern Physics. 2005. V. 77. P. 1131. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.77.1131>
2. *Байер В.Н., Катков В.М., Страховенко В.М.* Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах. Новосибирск: Наука, 1989.
3. *Ахмезер А.И., Шувльга Н.Ф.* // ЖЭТФ. 1983. Т. 85. С. 94.
4. *Басков В.А.* // КСФ. 2012. № 10. С.28. <https://doi.org/10.3103/S1068335612100041>
5. *Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И., Тугаенко В.Ю., Хабло В.А.* // КСФ. 2013. № 5. С. 3. <https://doi.org/10.3103/S1068335613050011>
6. *Басков В.А.* // КСФ. 2015. № 4. С. 3. <https://doi.org/10.3103/S1068335615040016>

7. Басков В.А. // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 99. С. 785. <https://doi.org/10.7868/S0370274X14120017>
8. Soldani M., Bandiera L., Moulson M. et al. // Eur. Phys. J. C. 2023. V. 83. P. 101. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-11247-x>
9. Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И., Тугаенко В.Ю., Хабло В.А. // Труды сессии-конференции ЯФ ОФН РАН “Физика фундаментальных взаимодействий”, ИТЭФ, Москва, 2011. С. 16. http://matras.itep.ru/npd2kl/Malyi_zh/24_november/ba/Pt
10. Зверев В.Г., Лучков Б.И., Тугаенко В.Ю. Космофизика. Москва: Энергоиздат, 1987. С. 71.
11. Басков В.А. // КСФ. 2016. № 5. С. 3. <https://doi.org/10.3103/S1068335616050018>
12. Басков В.А. // КСФ. 2014. №3. С.32. <https://doi.org/10.3103/S1068335614030051>
13. Байер В.Н., Басков В.А., Ганенко В.Б. и др. Препринт ФИАН №204. Москва, 1988.
14. Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V., Sergienko V.I. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 1990. V. 297. P. 329. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(90\)91315-3](https://doi.org/10.1016/0168-9002(90)91315-3)
15. Басков В.А., Белоусов А.С., Ким В.В., Малиновский Е.И., Усик А.П., Хабло В.А. // ПТЭ. 2011. Т. 5. С. 66.
16. Словинский Б. // ЭЧАЯ. 1994. Т. 25. № 2. С. 417.
17. Горячев В. Н., Денисов С. П. // Ядерная физика и инжиниринг. 2021. Т. 12. № 4. С. 229. <https://doi.org/10.56304/S2079562920060275>
18. Басков В.А., Говорков Б.Б., Ким В.В., Лучков Б.И., Сергиенко В.И., Тугаенко В.Ю., Хабло В.А. // КСФ. 1992. № 9/10. С. 41.
19. Tikhomirov V.V., Haurylavets V. V., Lobko A. S., Mechinsky V. A. // Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies (ISMART 2016). 2017. V. 200. P. 259. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68465-9_16
20. Elsener K., Möller S.P., Petersen J.B.B., Uggerhøj E. // Cosmic Gamma Rays, Neutrinos, and Related Astrophysics. NATO ASI Series. V. 270. P 457. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0921-2_31
21. Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И., Тугаенко В.Ю., Хабло В.А. // КСФ. 2012. № 8. С. 16. <https://doi.org/10.3103/S1068335612080039>
22. Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И., Тугаенко В.Ю., Хабло В.А. // КСФ. 2013. № 4. С. 35. <https://doi.org/10.3103/S1068335613040052>
23. Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И., Тугаенко В.Ю., Хабло В.А. // КСФ. 2011. № 6. С. 8. <https://doi.org/10.3103/S1068335611060029>