

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**



имени

П. Н. Лебедева

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

В.А. БАСКОВ, В.В. КИМ, Б.И. ЛУЧКОВ,
В.Ю. ТУГАЕНКО, В.А. ХАБЛО

31

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР
С КОНВЕРТЕРОМ ИЗ ОРИЕНТИРОВАННОГО
КРИСТАЛЛА**

МОСКВА 2006

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР С КОНВЕРТЕРОМ ИЗ ОРИЕНТИРОВАННОГО КРИСТАЛЛА

В.А. Басков*, В.В. Ким, Б.И. Лучков¹, В.Ю. Тугаенко¹, В.А. Хабло

А Н Н О Т А Ц И Я

Показано, что электромагнитный ливень, выходящий из ориентированного конвертора, являющимся кристаллом вольфрама, граната или вольфрамата и развивающийся далее в черенковском спектрометре полного поглощения, вызывает в спектрометре отклик, отличный от отклика стандартного ливня.

ELECTROMAGNETIC SPECTROMETER WITH ORIENTED CRYSTAL CONVERTER

V.A. Baskov, V.V. Kim, B.I. Luchkov, V.Yu. Tugaenko, V.A. Khablo

A B S T R A C T

It is shown that an electromagnetic shower leaving an oriented converter comprising tungsten, garnet or tungstate crystal that further develops in the total absorption spectrometer stimulates a response in the spectrometer that is different from the response of a standart shower.

1 - Инженерно-физический институт, г. Москва, Россия

* - baskov@x4u.lebedev.ru

Введение

При взаимодействии γ -квантов, электронов и позитронов с энергией $E > 100 \text{ МэВ}$ 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) работает когерентный механизм излучения электронов (позитронов) и рождения e^+e^- пар γ -квантами, сутью которого является увеличение сечений указанных процессов. В отличие от аморфного вещества на “длине формирования” процессов излучения электроном (позитроном) и рождения e^+e^- пар γ -квантом в кристалле оказывается большая совокупность ядер, приводящая к значительному увеличению вероятности процессов ($l \gg a$, l – длина когерентности или “длина формирования”; a – постоянная решетки). Особенно сильный эффект возникает при входе частиц с энергиями в десятки ГэВ в кристалл при углах $\Theta \ll V/m \cdot c^2$. В этом случае траектория частицы существенно отличается от прямолинейной и начинает работать механизм “постоянного сильного поля” (ПСП), приводящий еще к более значительному росту сечений электродинамических процессов. Поэтому электромагнитные ливни, развивающиеся в поле оси или плоскости кристалла, отличаются от ливней в аморфном веществе. Отличие ливней обусловлено разным числом фотонов N_γ и числом заряженных частиц N_e с соответствующими величинами энергий на заданной глубине развития ливня. Ливни, развивающиеся в ориентированных кристаллах, в отличие от ливней в аморфном веществе называют аномальными ливнями [1,2].

Отличие электромагнитного ливня, выходящего из ориентированного кристалла (кристалл считается ориентированным, когда $\Theta = 0$, где Θ – угол между импульсом γ -кванта, электрона или позитрона и осью (плоскостью) кристалла, относительно которой происходит ориентация) и далее развивающегося в электромагнитном спектрометре, должно сказаться на его

отклике. Было обнаружено, что энергосигналы от электронов с энергией 26 и 28 ГэВ, выходящих из ориентированных кристаллов разных толщин и типов (вольфрама (W), граната ($Gd_3Ga_5O_{12}$), вольфрамата ($PbWO_4$)) и продолжающих развиваться в составном черенковском ливневом спектрометре (СЧЛС) (рис. 1), отличаются от энергосигналов ливней, выходящих из разориентированных кристаллов. Например, появляется ориентационная зависимость параметров ливня, не наблюдающаяся при развитии ливней в аморфном веществе [3–6].

В данной работе рассматриваются характеристики электромагнитного спектрометра, регистрирующего электромагнитные ливни, выходящие из ориентированных кристаллов вольфрама, граната и вольфрамата. Работа была выполнена на установке “Каскад” на электронном канале 2В ускорителя ИФВЭ в рамках программы изучения эффектов квантовой электродинамики в сильных полях ориентированных кристаллов.

Установка

Схема установки “Каскад” представлена на рис. 1. Сцинтилляционные счетчики А1-А3, С1-С6 формировали триггер. Пропорциональные камеры ПК1-ПК3 использовались для определения координат входа каждого электрона в кристалл. Сцинтилляционный счетчик Т предназначался для определения средней множественности заряженных частиц в ливнях, выходящих из кристалла. Для создания пучка фотонов использовалась амплитудно-координатная система мечения фотонов на основе многоканального свинцово-сцинтилляционного спектрометра полного поглощения на сместителях спектра (МСПЭС) [7]. В работе использовались кристаллы вольфрама толщиной 0,07, 0,3, 1, 2,7, 5,8, 8,4 мм ($X_0 = 3,5$ мм), граната толщиной 6, 23, 50, 130 мм ($X_0 = 14,5$ мм) и вольфрамата толщиной 20 и 30 мм ($X_0 = 9$ мм). Кристаллы граната и вольфрамата прозрачные и, как

отмечено в работе [6], ориентация этих кристаллов впервые осуществлялась по сигналам, снимаемых непосредственно с кристаллов с помощью ФЭУ-85.

Ориентация кристаллов осуществлялась вдоль оси $\langle 111 \rangle$. Разориентированным считался кристалл, ось которого была повернута относительно оси пучка электронов на угол $\Theta = 20 \div 30$ мрад. Мозаичность кристаллов составляла $\Delta\Theta_w \approx 1$ мрад. В эксперименте использовался пучок электронов с энергиями $E_e = 26$ и 28 ГэВ с расходимостью $|\nu| \leq 0,1$ мрад по основанию. Ливень, выходящий из кристалла, продолжал развиваться в СЧЛС, стоявший в 65 см за кристаллами вольфрама и в 40 см за кристаллами граната и вольфрамата.

СЧЛС состоял из 10 независимых светоизолированных счетчиков (радиаторов) из свинцового стекла ТФ-1. Счетчики имели одинаковый размер 100×100 мм² и толщину 1 рад. длину. (радиационную длину). Сигнал с каждого счетчика регистрировался ФЭУ-85. Для сбора оставшейся части ливня за СЧЛС был помещен черенковский спектрометр ЧС толщиной 15 рад. длин. ЧС имел шестигранный радиатор из свинцового стекла ТФ-1 с диаметром вписанной окружности 180 мм. Для снятия сигнала использовался ФЭУ-49-Б. ЧС также использовался для калибровки СЧЛС.

Продольное развитие ливней

На рис. 2 и 3 приведены каскадные и интегральные кривые развития электромагнитных ливней от электронов, выходящих из разориентированных (а) и ориентированных (б) кристаллов вольфрама и далее продолжающих развиваться в СЧЛС и ЧС. На рисунках по оси абсцисс отложена толщина спектрометра СЧЛС в радиационных длинах (для последней точки рис. 3 толщина спектрометра равна сумме толщин СЧЛС и ЧС). По оси ординат на рис. 2 отложена средняя энергия ливня, оставленная им в каждом счетчике

спектрометра, а на рис. 3 отложена средняя суммарная энергия ливня, выделенная в спектрометре соответствующей толщины с учетом энергии ливня, оставленной в кристаллах вольфрама. Статистические ошибки на рис. 2 и 3 не приведены, поскольку составляли менее 1%. На рис. 2а и 3а кривая К - калибровочная кривая, относится к случаю отсутствия перед СЧЛС кристаллического конвертора. В этом случае начало развития ливня приходится на первый счетчик СЧЛС.

Если перед СЧЛС находится разориентированный кристалл вольфрама, являющимся практически аморфным веществом, начало развития ливня и начало соответствующей каскадной кривой приходится на кристалл. Соответственно, по мере наращивания толщины кристалла начало развития ливня все дальше сдвигается от СЧЛС. На рис. 2а и 3а хорошо видно, что по мере наращивания толщины кристалла каскадная и интегральная кривые сдвигаются относительно своего первоначального положения (калибровочных кривых). Экстраполяция кривых в область начала развития ливня, то есть в кристалл, осуществлялась с помощью аналитической формулы, используемой в работе [5].

Из рис. 3а видно, что 90–95% энергии ливня регистрируется спектрометром толщиной $13 \div 15$ рад. длин. Начиная с этой толщины относительное энергетическое разрешение спектрометра изменяется не сильно, поэтому вплоть до энергий электронов (позитронов) и фотонов в десятки ГэВ в экспериментах используются калориметры с толщиной около 15 рад. длин.

При ориентации кристалла характер электромагнитного ливня в кристалле меняется, что сказывается на изменении отклика спектрометра за кристаллом, выраженном в изменении каскадных и интегральных кривых [3-6]. На рис. 2б и 3б видно увеличение энерговыделения в первых счетчиках СЧЛС и еще большая сдвижка каскадных и интегральных кривых к началу

развития ливня. Особенно заметно увеличение энерговыделения для толстых кристаллов 5,8 и 8,4 мм. В отличие от случая разориентированного кристалла, регистрация 90-95% энергии ливня осуществляется меньшим числом счетчиков СЧЛС или соответствующей толщиной спектрометра. Рис. 3б показывает, что число счетчиков уменьшается с 15 до ≈ 12 ($t_w = 2,7$ мм) и до ≈ 10 ($t_w = 8,4$ мм), что от 20% до 30% меньше толщины обычного спектрометра.

На рис. 4 приведены каскадные кривые развития электромагнитного ливня в кристаллах граната. Характер развития ливня в ориентированном кристалле граната (рис. 4б) аналогичен развитию ливня в кристалле вольфрама (рис. 2б), то есть при ориентации кристалла начало развития ливня сдвигается в кристалл и каскадная кривая “сжимается”.

Рисунок 5а показывает интегральные кривые развития ливня в кристалле граната. Поведение кривых после 9 рад. длины экстраполировано с учетом рис. 3 и 6. Тем не менее, видно что ориентация кристалла сдвигает кривую 2 приблизительно на три рад. длины к началу развития. То есть для полного поглощения ливня потребуется кристалл толщиной ~ 14 рад. длин. Из характера кривой 2, которая, в общем, не параллельна кривой 1, можно предположить, что влияние ориентированности на развитие ливня происходит и при значительных толщинах кристалла ($t_G > 9$ рад. длин).

На кривые рис. 5а нанесены также точки развития ливня в кристалле вольфрама. Более детально кривая развития ливня на начальной стадии (на первых трех рад. длинах) показана на рис. 5б. Видно, что в терминах рад. длины точки хорошо ложатся на кривые развития ливня в гранате. Это говорит об одном и том же характере развития ливня в разных кристаллах при одних и тех же условиях: в аморфном веществе ливень (разориентированном кристалле) развивается по кривой - 1; в ориентированном кристалле развитие идет по кривой - 2. Хотя ливни по параметрам, например, по множественности

заряженных частиц в обоих случаях отличаются друг от друга [12].

Радиационная длина аморфного вещества, в котором развивается обычный ливень, практически постоянна [13]. Однако, при ориентации кристалла вдоль оси или плоскости, в спектрометре происходит сдвигка каскадной кривой. При фиксированной толщине кристалла это может означать изменение радиационной длины кристалла [8,9,10]. К основным факторам, влияющим на изменение рад. длины кристалла, относятся: потенциал оси или плоскости кристалла, угол ориентации, толщина кристалла, энергия налетающего электрона (позитрона) или фотона.

На рис. 6 представлена зависимость “эффективной” толщины ориентированного кристалла вольфрама от его толщины в аморфном состоянии. Видно, что в случае ориентации кристалла его “эффективная” толщина увеличивается.

Зависимость рад. длины ориентированного кристалла вольфрама от толщины разориентированного (аморфного) представлена на рис. 7. Зависимость сложная. При данных энергиях электронов ($E_e = 26$ и $E_e = 28$ ГэВ) и тонких кристаллах ($t_w \leq 0,5$ мм) рад. длина почти в 6 раз меньше, чем рад. длина разориентированного кристалла. При увеличении толщины кристалла рад. длина начинает плавно возрастать, но начиная с толщины около 4 мм изменяется слабо.

На рис. 8 представлены результаты исследований зависимости рад. длины ориентированного кристалла вольфрама от энергии γ -квантов, полученные в данной работе и работе [9]. Результаты приведены для кристаллов толщиной 0,3 мм, 1 мм и 3,2 мм соответственно (ось ориентации $\langle 111 \rangle$, $T_{0,3\text{мм}} = 293^\circ\text{K}$, $T_{1\text{мм}} = 77^\circ\text{K}$ и $T_{3,2\text{мм}} = 100^\circ\text{K}$ [9]). Рисунок показывает, что наибольшее изменение рад. длины также происходит при небольших ($t_w \leq 0,5$ мм) толщинах кристалла и уменьшается с увеличением энергии γ -квантов.

Зависимости рис. 7 и 8 были получены следующим образом: для каждой толщины кристалла при разориентации ($t_{\text{кристалл}} = t_p$) на каскадной кривой (рис. 2а) фиксировалось энерговыделение на первой рад. длине СЧЛС, то есть при $t_{\text{счлс}}^{\text{раз}} = 1$ рад. длины (в этом случае влияние множественного рассеяния каскадных частиц в детекторе минимальное). В дальнейшем определялось: на какой глубине развития ливня в СЧЛС ($t_{\text{счлс}}^{\text{оп}}$) имеется такое же энерговыделение при ориентированном кристалле ($t_{\text{кристалл}} = t_0$). Так как при ориентации перед кристаллом вещество не помещается, а каскадная кривая сдвигается в сторону начала развития ливня, то это означает, что эффективная толщина ориентированного кристалла увеличивается на величину $\Delta t = t_{\text{счлс}}^{\text{раз}} - t_{\text{счлс}}^{\text{оп}}$ и составляет $t_0 = t_p + \Delta t$. Новая рад. длина ориентированного кристалла X'_0 , таким образом, определяется:

$$X'_0 = X_0 \cdot (1 + \Delta t / t_p)^{-1}, \quad (1)$$

где X_0 - рад. длина разориентированного кристалла.

При ориентации кристалла каскадная кривая сдвигается по всей длине детектора, в котором развивается ливень. В этом случае, в счетчиках за максимумом каскадной кривой, в отличие от счетчиков, где имеет место начальная стадия развития ливня, энерговыделение уменьшается. Характер развития ливня в черенковском спектрометре ЧС в зависимости от толщины вольфрамового и гранатового конверторов перед ним (с учетом толщины счетчиков СЧЛС) представлен на рис. 9

Рис. 9 также показывает, что характер развития электромагнитного ливня в спектрометре одинаков как для разориентированного, так и для ориентированного конверторов. Действительно, чтобы получить энерговыделение в детекторе СЧЛС+ЧС, например, $\Delta E \approx 0,05$ ГэВ нужно перед ним поставить аморфный конвертор толщиной 4 рад. длины или разориентированный кристалл толщиной 2,5 рад. длины и потом его

ориентировать.

Рис. 3 показывает общее уменьшение энергии ливня, выходящего из кристалла вольфрама и регистрируемого составным спектрометром СЧЛС и ЧС ($t_{\text{счлс+чс}} = 25$ рад. длин), особенно в случае ориентации кристалла. Зависимость отношения средней энергии, регистрируемой составным спектрометром СЧЛС+ЧС и энергии, выделившейся в кристалле, к средней энергии, регистрируемой СЧЛС+ЧС при калибровке, от толщины кристаллов, представлена на рис. 10 (в случае кристаллов вольфрама в общее энерговыделение внесена энергия ливня, выделявшаяся в самом кристалле). При помещении дополнительного вещества перед СЧЛС в виде разориентированного кристалла, например, вольфрама толщиной 8,4 мм происходит недобор энергии $\approx 4,6\%$ (кривая 1). Если кристалл ориентирован, недобор энергии становится заметным и достигает $\approx 11\%$ (кривая 2), то есть увеличивается в $\approx 2,5$ раза.

Для вольфрама нерегистрируемая часть энергии включает в себя энергию ливня непосредственно поглощенную кристаллическим конвертором и энергию ливня, унесенную рассеянными заряженными частицами как из кристалла и непосредственно из детектора, так и рассеянными в промежутке между кристаллом и детектором, то есть на воздухе, сцинтилляционных счетчиках СЗ, Т и ПКЗ. Энергия ливня, унесенная заряженными частицами и фотонами через боковые стороны и заднюю часть детектора, учитывается при калибровке детектора. Для прозрачных кристаллов нерегистрируемая часть энергии включает в себя энергию ливня только унесенную рассеянными заряженными частицами.

Рис. 11 представляет зависимости энергии “недобранной” составным спектрометром СЧЛС+ЧС при разориентированном (зависимость 1) и ориентированном (зависимость 2) кристаллах ($\langle \Delta E \rangle = E_e - \langle E_{\text{счлс+чс}} \rangle$, где $E_e =$

26 ГэВ - энергия первичного пучка; $\langle E_{\text{СЧЛС+ЧС}} \rangle$ - суммарная энергия ливня, зарегистрированного спектрометром СЧЛС+ЧС). Для кристаллов вольфрама энергию $\langle \Delta E_w \rangle$, оставленную ливнем в разориентированном и ориентированном конверторе, можно оценить, экстраполировав кривые рис. 2 в область $t_w > 0$ (зависимости 3 и 4). Разности зависимостей 1 и 3, а также 2 и 4 дают энергию ливня, рассеянную при разориентированном и ориентированном кристалле в промежутке между кристаллом и детектором.

На рис. 12 представлены зависимости рассеянной энергии для разориентированного и ориентированного кристалла вольфрама в зависимости от толщины. Видно, что при ориентации кристалла величина рассеянной энергии возрастает. Аналогичный результат наблюдался в работах [6,11].

Разная величина максимума каскадных кривых на рис. 2б также связана с увеличением энергии, поглощаемой ориентированным кристаллом вольфрама при увеличении толщины кристалла. В случае разориентации (рис. 2а) этот эффект заметен слабо. В случае прозрачных кристаллов энергия поглощенная кристаллом регистрируется и максимумы у всех каскадных кривых одинаковы (рис. 4б).

Эффект значительного рассеяния можно объяснить наличием большего чем в обычном ливне числе заряженных частиц, рожденных за счет механизма Бете-Гайтлера мягкими гамма-квантами, способных более эффективно рассеиваться в веществе [1,2].

Эффект также указывает на то, что мольеровский радиус r_M , определяющий поперечное развитие ливня, в ориентированном кристалле отличается от аналогичного радиуса обычного ливня.

Поперечное развитие ливней

Используя результаты работы можно оценить r_M ориентированного кристалла вольфрама.

Теория развития стандартных ливней в веществе и эксперимент показывают, что число вторичных частиц N в ливне составляет $N \sim E_0/\varepsilon_k$, где E_0 – энергия первичной частицы, ε_k – критическая энергия. В легком веществе критическая энергия (ε_k^l) больше, чем в тяжелом (ε_k^t) (например для алюминия и свинца, $\varepsilon_k^{Al}/\varepsilon_k^{Pb} \cong 6$). Соответственно, в ливне, развивающемся в легком веществе, число вторичных частиц в $\varepsilon_k^l/\varepsilon_k^t$ раз меньше, чем в тяжелом, при одной и той же энергии первичной частицы. Пространственные распределения вторичных частиц в каскадах для легких и тяжелых веществ также различаются. На рис. 13 показаны контурами эффективные области развития ливней в алюминии и свинце при одной и той же энергии первичной частицы. Для алюминия $r_M^{Al} \cong 0,5 \cdot X_0^{Al}$, а для свинца $r_M^{Pb} \cong 3 \cdot X_0^{Pb}$. Поэтому эффективная область развития ливня в свинце в ≈ 6 раз шире, чем в алюминии [13].

Отношение площадей контуров $\eta_1 = \Delta E^{Pb}/\Delta E^{Al}$ из рис. 13 ($\Delta E^{Pb(Al)}$ – энергия, выделяющаяся на соответствующей глубине развития ливня в свинце и алюминии) в зависимости от глубины развития ливня представлено на рис. 14 (кривая 1). На этом же рисунке с учетом данных рис. 12 показано отношение рассеянной энергии при ориентированном ($\langle \Delta E_{op}^{расс} \rangle$) к рассеянной энергии при разориентированном ($\langle \Delta E_{раз}^{расс} \rangle$) кристаллах $\eta_2 = \langle \Delta E_{op}^{расс} \rangle / \langle \Delta E_{раз}^{расс} \rangle$ (кривая 2) и, в частности, для кристаллов вольфрама.

Так как $r_M^W \cong 3 \cdot X_0^W$, то эффективная область развития ливня на рис. 13 для свинца приблизительно совпадает с эффективной областью развития ливня в аморфном (разориентированном) вольфраме. Так как $\Delta E_{раз}^W \approx \Delta E^{Pb}$, то $\langle \Delta E_{op}^{расс} \rangle = \eta_2 \cdot \Delta E_{раз}^W \approx \eta_2 \cdot \Delta E^{Pb}$, где $\Delta E_{раз}^W$ – энергия, выделяющаяся на соответствующей глубине развития ливня в разориентированном кристалле. При ориентации кристалла продольное развитие ливня по глубине с учетом оценки из рис. 3б и рис. 6 уменьшается на 2,5 - 3 рад. длины. Таким образом, контур развития ливня в ориентированном кристалле вольфрама (выделен

пунктирной линией) значительно отличается от контура развития ливня в аморфном вольфраме.

Длина Мольера из этого рисунка для ориентированного кристалла вольфрама при энергии электронов 26 ГэВ составляет $\gamma_{\text{М}}^{\text{Wориент}} \cong 6 \cdot X_0^{\text{Wразор}}$.

Выводы

Результаты работы показывают, что аномальные электромагнитные ливни, возникающие в ориентированном кристаллическом конверторе перед электромагнитным спектрометром, даже при небольших энергиях частиц и толщине конвертора изменяют отклик этого спектрометра относительно отклика на стандартные ливни. Возникают эффекты, не наблюдающиеся при развитии стандартного ливня. Поэтому необходимо в дальнейшем экспериментально продолжать изучение этих ливней.

Эффекты развития ливней вдоль кристаллографических осей (плоскостей) в кристаллических конверторах и спектрометрах на основе кристаллов (PbWO_4 , BaF_2 и так далее) особенно при высоких энергиях электронов (позитронов) и γ -квантов необходимо учитывать в экспериментальной деятельности.

На основе эффектов в ориентированных кристаллах возможно создание новых детекторов – спектрометров направленного действия, которые можно использовать на ускорителях высоких энергий и в космических исследованиях.

Поскольку электромагнитные ливни основаны на фундаментальных процессах излучения электронов (позитронов) и рождение e^+e^- пар γ -квантами, то необходимо продолжать экспериментальное изучение аномальных ливней с точки зрения получения новой информации о влиянии кристаллической среды на фундаментальные процессы.

Необходимость получения новой экспериментальной информации

актуальна, так как существующие теории развития аномальных ливней не точно описывают экспериментальные результаты, особенно развитие ливней в толстых кристаллах.

Авторы выражают благодарность Е.И. Тамму и Е.И. Малиновскому за поддержку работы; В.И. Сергиенко за научное руководство и организацию работ; А.С. Белоусову и А.П. Усику за возможность использования СЧЛС; В.В. Полянскому и И.В. Конорову, сотрудникам ХФТИ (Украина) под руководством Л.Я. Колесникова и сотруднику ИФВЭ В.А. Маишееву за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Байер В.Н., Катков В.М., Страховенко В.М. Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах, издательство “Наука” СО АН СССР, г. Новосибирск, 1989.
2. Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф. Электродинамика высоких энергий в веществе, издательство “Наука”, г. Москва, 1993.
3. Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V. et al. Radiation Effects and Defects in Solids, 1993, **25**, 23.
4. Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V. et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. (B), **122** (1997) 194.
5. Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V. et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. (B), **145** (1998) 92.
6. Baskov V.A., Bugorsky A.P., Kachanov V.A. et al. Phys. Lett. (B), **456** (1999) 86.
7. Baskov V.A., Khablo V.A., Kim V.V., Sergienko V.I. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. (A), **297** (1990) 329.
8. Басков В.А., Говорков Б.Б., Ким В.В. и др. Краткие сообщения по физике, № **9,10**, Москва, изд. ФИАН, 1992, стр. 41.

9. Kirsebom K., Kononets Yu.V., Mikkelsen U. et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. (B), **135** (1998) 143.
10. Байер В.Н., Басков В.А., Ганенко В.Б. и др. ЖЭТФ, 1992, **101**, 1351.
11. Кулибаба В.Н., Коваленко Г.Д. ЖЭТФ, **78**, 433 (1980).
12. Басков В.А., Ким В.В., Лучков Б.И., Тугаенко В.Ю., Хабло В.А. Препринт ФИАН № 9, Москва, 2005.
13. Калиновский А.Н., Мохов Н.В., Никитин Ю.П. Прохождение частиц высоких энергий через вещество, Энергоатомиздат, Москва, 1985.