

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



19/12-77
P13 - 10876

3-895

5069/2-77

В.П. Зрелов

О ВОЗМОЖНОМ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИИ
ФОТОГРАФИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА
ДЛЯ ПОИСКА МОНОПОЛЯ ДИРАКА
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА

1977

P13 - 10876

В.П.Зрелов

О ВОЗМОЖНОМ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИИ
ФОТОГРАФИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА
ДЛЯ ПОИСКА МОНОПОЛЯ ДИРАКА
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ ВАВИЛОВА-ЧЕРЕНКОВА

Направлено в *"Nuclear Instruments and Methods"*

Зрелов В.П.

P13 - 10876

О возможном усовершенствовании фотографического детектора для поиска монополя Дирака по излучению Вавилова-Черенкова

В работе рассмотрены недостатки фотографического черенковского детектора, применяемого для исследования состава космического излучения по Z . Показано, что использование линзово-растрового радиатора позволяет существенно понизить требования к чувствительности фотослоя, упрощает определение скорости и направления релятивистских ядер, позволяет также более надежно вести поиск монополя Дирака.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Zrelov V.P.

P13 - 10876

On Possible Improvement of Photographic Detector to Search for Dirac Monopole by Vavilov-Cherenkov Radiation

Disadvantages of a photographic Cherenkov detector applied for investigation of a composition of cosmic radiation by Z are considered. It is shown that the use of a lens-raster radiator allows to low considerably requirements for a photolayer sensitivity, simplifies the determination of velocity and direction of relativistic nuclei, and makes it possible to search for Dirac's monopole with more reliability.

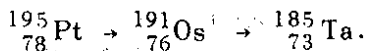
The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1977

1. Введение

В работе Прайса и др.^{/1/} описан случай регистрации в космических лучах быстрой частицы с сильной и характерной ионизацией, которую авторы идентифицировали как магнитный заряд с $g=137e$ и массой $m_g > 200$ масс протона.

Однако Альварец^{/2/} привел довольно убедительные аргументы против такой интерпретации и показал, что зарегистрированная в работе^{/1/} частица, скорее всего, является ядром ^{195}Pt , последовательно испустившим легкие фрагменты (с $Z=2$ и $Z=3$) по схеме



Несмотря на это, ввиду важности опытов по поиску магнитных зарядов* желательно усовершенствовать методику, разработанную в работе^{/3/} и примененную в^{/1/}.

2. Недостатки фотографического черенковского детектора

Для того, чтобы почувствовать недостатки этого детектора и сделать попытку его усовершенствования, сначала кратко опишем принцип его работы.

*См. также дискуссию в "New Pathways" in High Energy Physics, V.I. "Magnetic Charge and Other Fundamental Approaches", N.-Y.-L., 1976, p.167-213.

Вообще сама идея фотографической регистрации конуса излучения Вавилова-Черенкова от одиночной частицы с большим зарядом весьма оригинальна*. Однако реализация её не так проста.

Пусть частица с зарядом Z и скоростью $\beta > n^{-1}$ проходит прозрачный радиатор толщиной h перпендикулярно фотографическому слою, как показано на рис.1.

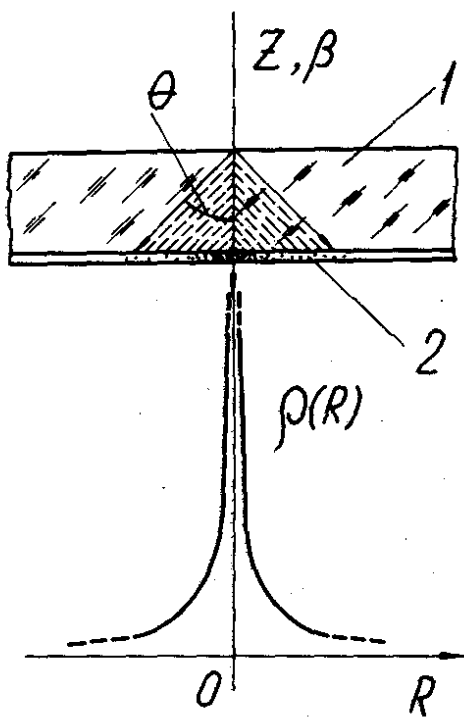


Рис.1. Фотографический черенковский детектор без фокусировки /3/: 1 - прозрачный радиатор, 2 - высокочувствительный фотослой.

В этом случае излучение Вавилова-Черенкова, зарегистрированное фотослоем, будет иметь вид круга.

Распределение плотности излучения $\rho(R)$ по пятну получается как отношение энергии излучения на единице пути, выражаемое формулой Тамма-Франка /4/

$$\frac{dW}{dx} = 2\pi^2 e^2 Z^2 \frac{\lambda_2^2 - \lambda_1^2}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \sin^2 \theta \frac{эрг}{см}, \quad (1)$$

к площади кольца, в которое это излучение попадает,

* Авторы работы /3/ сообщают, что эту идею впервые высказали G.D. Badhwar, C.L. Doney and M.F. Kaplan.

$\Delta S = 2\pi R \Delta R$. Учитывая, что $\frac{\Delta x}{\Delta R} = \frac{1}{\operatorname{tg} \theta}$, получим

$$\rho(R) = \pi e^2 Z^2 \frac{\lambda_2^2 - \lambda_1^2}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \frac{\sin \theta \cos \theta}{R} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}, \quad (2)$$

т.е. $\rho(R) \sim \frac{1}{R}$.

На радиусе пятна $R = 10$ мкм при $\lambda_1 = 300$ нм, $\lambda_2 = 700$ нм, $\theta = 45^\circ$ согласно формуле (2) $\rho(10 \text{ мкм}) = 3,2 \cdot 10^{-3}$ эрг/см². Эту величину можно перевести в плотность фотонов с помощью соотношения

$$N_{\text{КВ}} = 5,304 \rho(\lambda) \lambda \frac{\text{квант}}{(\text{мкм})^2}, \quad (3)$$

(где λ - в нм), что составит $N_{\text{КВ}} \approx 8 \frac{\text{квантов}}{(\text{мкм})^2}$.

При больших R плотность черенковского излучения может стать ниже пороговой чувствительности фотослоя S , которая связана с ρ зависимостью $S(\lambda) = \rho^{-1}(\lambda) \frac{\text{см}^2}{\text{эрг}}$. Поэтому, чтобы на $R = 10$ мкм получилось черенковское изображение, спектральная чувствительность фотослоя должна быть $S(\lambda) \sim 300 \text{ см}^2/\text{эрг}$.

Заметим, что такая чувствительность существенно выше, чем спектральная чувствительность аэрофотопленки "Изопанхром 13", имеющей согласно /5/ при $\bar{\lambda} = 400$ нм $S(\bar{\lambda}) \approx 50 \text{ см}^2/\text{эрг}$ (при плотности почернения $D = D_{1+0,2}$).

Таким образом, кроме трудностей, связанных с необходимостью использования в таком детекторе фотослоев с предельной чувствительностью, возникают ввиду отсутствия резкой границы пятна значительные трудности в определении угла излучения Вавилова-Черенкова (особенно для случая наклонного падения частицы на фотослой), а следовательно, и скорости частицы.

3. Детектор с фокусировкой (рис.2)

Вместо плоского радиатора, примененного в работе^{/3/}, предлагается детектор, у которого одна поверхность радиатора, обращенная к фотослою, выполнена с фокусирующими элементами в виде линзового растра.

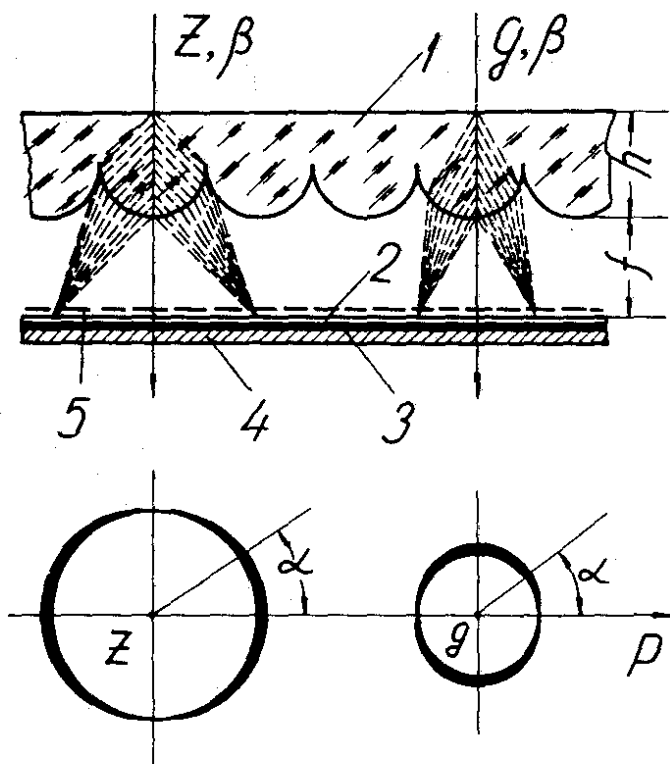


Рис.2. Фотографический черенковский линзово-растровый детектор: 1 - линзово-растровый радиатор; 2 - фотослой; 3 - противоореольный слой; 4 - подложка; 5 - пленочный поляроид.

Если фокусное расстояние элемента растра равно f , то излучение от частицы с зарядом Z соберется в ма-

ленькое колечко радиусом $r=f \cdot \operatorname{tg} \theta$ (θ - половина угла раскрытия конуса излучения).

Примем, что размытие кольца излучения Вавилова-Черенкова в фокальной плоскости такого детектора обусловлено в основном хроматическими эффектами*. Тогда площадь кольца размытия изображения (для перпендикулярного падения частицы на растр) составит

$$\Delta S = 2\pi f^2 \frac{\Delta \theta_{\text{хр}} \cdot \operatorname{tg} \theta}{\cos^2 \theta}, \quad (5)$$

где $\Delta \theta_{\text{хр}} = \left| \frac{2C\lambda}{n\lambda^3 \operatorname{tg} \theta} \right|$, а C - постоянная в формуле Коши для зависимости $n(\lambda) = n_0 + \frac{C}{\lambda^2}$.

С учётом выражения $\Delta \theta_{\text{хр}}$ формула (5) будет иметь вид

$$\Delta S = 4\pi f^2 \frac{\lambda}{n(\lambda) \lambda^3 \cos^2 \theta}. \quad (6)$$

Если фокусирующий элемент растра имеет сферическую поверхность с радиусом $R_{\text{сф}}$, то $f(\lambda) = \frac{R_{\text{сф}}}{n(\lambda) - 1}$.

Плотность излучения в кольце в этом случае будет определяться выражением

* Тригонометрический расчёт хода лучей в таком радиаторе показывает, что, например, размытие кольца излучения за счёт сферической aberrации может и превосходить размытие, связанное с хроматической aberrацией. Однако оно может быть существенно уменьшено путем размещения фотослоя ближе к растру приблизительно на $0,4 \cdot f_0$ (где f_0 - фокусное расстояние линз растра для параксиальных лучей). Заметим также, что применение в растре параболических фокусирующих элементов также уменьшает сферическую aberrацию.

$$\rho_{\text{фок}} = \frac{\pi e^2 Z^2 (\lambda_1 + \lambda_2) \bar{\lambda}^{-3} n(\lambda) \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{2 \lambda_1^2 \lambda_2^2 f^2 C} h, \quad (7)$$

где h - эффективная толщина мозаичного радиатора.
 При $\lambda_2 = 2\lambda_1$ и $\bar{\lambda} = \frac{3}{2}\lambda_1$ формула (7) имеет вид

$$\rho_{\text{фок}} = 1,27 \frac{\pi e^2 Z^2 n(\lambda) \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{f^2 C} h. \quad (8)$$

Возьмем отношение плотностей излучения, выражаемых формулами (7) и (2):

$$K = \frac{\rho_{\text{фок}}}{\rho(R)} = \frac{n(\lambda) \sin \theta \cos \theta h R}{\Delta n f^2}, \quad (9)$$

где Δn - определяется дисперсией материала радиатора в диапазоне длин волн от λ_1 до λ_2 . При условии $\theta = 45^\circ$, $f = R = h$ $K = \frac{n(\lambda)}{2\Delta n}$. Для полиметилметакрилата в диапазоне длин волн от $\lambda_1 = 300$ нм до $\lambda_2 = 700$ нм $\Delta n \approx 4 \cdot 10^{-2}$, а $K \approx 19$. Если принять, что за счёт других aberrаций размытие кольца по радиусу может удвоиться, то эффективное $K_{\text{эф}} = K/2$.

Таким образом, для черенковского фотографического детектора с фокусирующими элементами чувствительность фотослоя может быть в K раз меньше, чем для детектора без фокусировки, или при фотослое с высокой чувствительностью порог регистрации частиц по Z может быть понижен в $\sqrt{K_{\text{эф}}}$ раз, а определение скорости частицы по радиусу кольца может быть более надёжным.

Наряду с отмеченными преимуществами детектор с фокусировкой имеет свои недостатки. В частности, для получения более равномерного распределения чувстви-

тельности по поверхности требуется по крайней мере трехслойный детектор со смещенными (на радиус фокусирующего элемента) слоями по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Кроме этого, при значительных углах наклона частиц к площади радиатора конус излучения Вавилова-Черенкова может попасть в несколько элементов раstra, что затруднит определение угла входа и скорости частицы. Что касается трудностей приготовления такого детектора, то, по-видимому, они не так велики, так как технология изготовления растров достаточно разработана /8/.

Заметим, что в качестве радиатора излучения Вавилова-Черенкова в детекторе с фокусировкой можно пытаться использовать отражательную систему пузырьковых камер типа "скотч-лайт", в которой применяются калиброванные по диаметру шарики из стекла с высоким показателем преломления ($n \approx 2$), что может понизить также пороговую скорость регистрируемых частиц $\beta_{\min} \approx 0,5$.

4. Фотографический детектор с анализом поляризации излучения Вавилова-Черенкова

В эксперименте /6/ по поиску монополя Дирака на протонном синхротроне 70 ГэВ (ИФВЭ) электронной методикой уже использовалась идея Франка /7/ о различиях в поляризации излучения Вавилова-Черенкова от электрического и магнитного зарядов. Впоследствии применительно к фотографическому черенковскому детектору эта идея также была высказана в работе /8/.

Однако введение в фотографический детектор без фокусировки анализатора поляризации в виде пленочного поляроида приведет к уменьшению интенсивности излучения Вавилова-Черенкова, в результате чего плотность излучения может стать близкой к пороговой.

Поскольку в детекторе с фокусировкой плотность излучения гораздо больше, чем в детекторе без фокусировки, использование в первом анализатора поляризации

излучения позволит более надежно вести поиск магнитных зарядов на фоне электрически заряженных частиц.

При этом распределения плотностей излучения в фокальной плоскости линзового растра от частицы с электрическим зарядом Z и магнитным g будут иметь вид

$$\rho_{\text{Фок}}^Z = 1,27 \frac{\pi e^2 Z^2 n(\lambda) \sin^2 \theta \cos^2 \theta h}{f^2 C} \tau_1(\lambda) \tau_2(\lambda) \cos^2 \alpha,$$

$$\rho_{\text{Фок}}^g = 1,27 \frac{\pi e^2 g^2 n^3(\lambda) \sin^2 \theta \cos^2 \theta h r_1(\lambda) \tau_2(\lambda) \sin^2 \alpha}{f^2 C}, \quad (10)$$

где $\lambda = \frac{3}{2} \lambda_1$, $\lambda_2 = 2\lambda_1$, $\tau_1(\lambda)$ и $\tau_2(\lambda)$ — пропускные способности материала линзового растра и пленочного поляроида, α — азимутальный угол между направлением пропускания излучения с электрическим вектором E , параллельным направлению поляризации поляроида P , и плоскостью падения излучения на поляроид. Примерное распределение плотностей излучения для частиц Z и g показано в нижней части рис. 2.

В заключение хочу поблагодарить доктора физико-математических наук В.М.Сидорова за ряд стимулирующих обсуждений этой работы.

Литература

1. Price P.V. e.a. Phys.Rev.Lett., 1975, 35, No. 8, p. 487.
2. Alvarez L.W. Preprint LBL-4260, 1975.
3. Shirk E.K. e.a. Phys.Rev., 1973, 7, No. 11.
4. Тамм И.Е., Франк И.М. ДАН СССР, 1937, 14, 107.

5. Гороховский Ю.Н., Баранова В.П. Свойства черно-белых фотографических пленок. Наука, М., 1970, стр. 254.
6. Zrelou V.P. e.a. JINR, E1-9646, Dubna, 1973;
Зрелов В.П. и др. ОИЯИ, P1-7996, Дубна, 1974.
7. Черенков П.А., Тамм И.Е., Франк И.М. Нобелевские лекции, Физматгиз, М., 1960, стр. 53.
8. Валюс Н.А. Растровая оптика. Гостехиздат, М.-Л., 1949.
9. Hangston R. Phys.Rev.Lett., 1975, v. 35, No. 25, p. 1677.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 июля 1977 года.