

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра физики частиц и космологии

Курсовая работа

по теме:

Обсерватория космических лучей
на поверхности Европы

Выполнил
студент 2 курса гр. 213:
Ф.И.О.
Лучкин В.Н.
“ 13 ” мая 2015
Научный руководитель
Ф.И.О.
Горбунов Д. С.

Москва, 2015г.

Оглавление

1. Введение	3
2. Европа	4
3. Предмет исследования – излучение Черенкова-Вавилова	5
4. Определение характеристик частицы	7
4. Заключение.....	11
5. Приложение.....	12
5.1. Расчет погрешностей в измерении величин.	12
Список литературы	13

1. Введение

Космические лучи – одно из интереснейших явлений природы, изучение которого дало значительные результаты и представляет исключительный интерес в связи с актуальными проблемами ядерной физики и астрофизики. Космические лучи были открыты в начале XX века в экспериментах Кольхерстера, Гоккеля, Гесса.

Долгое время космические лучи были основным источником частиц высоких энергий для изучения процессов, происходящих при их взаимодействиях с атомными ядрами, пока не вступили в строй ускорители частиц, позволившие значительно точнее изучать эти явления.

Но на данный момент энергия в ускорителях достигает 14 ТэВ и строительство новых представляется проблематичным, поэтому для изучения новых явлений мы снова возвращаемся к космическим лучам. Более того, так как энергетический спектр космических лучей крайне широк: от 10^9 до 10^{20} эВ и их состав разнообразен, они представляются идеальным объектом для изучения.

Одним из методов исследования космических лучей является изучение излучения Черенкова-Вавилова, которое возникает при прохождении заряженной частицы через вещество со скоростью, большей фазовой скорости света в этом веществе. Данное излучение несет в себе много информации о частице, из-за которой это излучение образовывается. Поэтому зная характеристики среды можно достаточно много узнать о первоисточнике.

В данной работе будет предложен эксперимент по изучению космических лучей на спутнике Юпитера – Европе. Будут изложены основные методы по определению характеристик частицы по излучению, которое она создает при прохождении через лед.

2. Европа

Чем же так интересна Европа в плане исследования космических частиц? У Европы есть несколько очень важных отличий от остальных космических объектов в Солнечной системе.

Во-первых, атмосферное давление на поверхности Европы примерно равно 0,1 мкПа или в 10^{12} раз ниже земного. Это очень важно при исследовании космических лучей в их первичном виде, так как, например, при взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли, образуются вторичные частицы, которые образуют каскадный процесс, называемый широким атмосферным ливнем. Отсутствие же атмосферы на Европе позволяет исследовать сами космические лучи, а не результат их взаимодействия с атмосферой.

Во-вторых, поверхность Европы одна из самых ровных в Солнечной системе, лишь немногие образования, напоминающие холмы, имеют высоту до нескольких сотен метров. Это существенно упрощает механизм приземления детекторов и создание системы именно такого вида, которых необходим нам для нашего эксперимента.

В-третьих, поверхность Европы покрыта льдом, что очень важно для проведения этого эксперимента, так как мы будем исследовать результат взаимодействия частиц высоких энергий со льдом. Этим результатом является излучение Черенкова-Вавилова, которое образуется при прохождении заряженной частицей через вещество со скоростью, превышающей фазовую скорость фотонов в данном веществе.

Все это делает Европу идеальным местом для исследования космических лучей. Более того, на данный момент ведутся разработки экспедиций на Европу для исследования характеристик льда Европы (EuropaJupiterSystemMission), что позволяет предположить, что данный эксперимент также может быть рассмотрен и в перспективе реализован.

3. Предмет исследования – излучение Черенкова-Вавилова

В данной задаче мы будем исследовать излучение Черенкова-Вавилова. Это излучение возникает, когда заряженная частица движется в среде со скоростью, большей чем фазовая скорость света в этой среде. Данное явление очень распространено в физике космических лучей, так как зачастую частицы обладают достаточной скоростью, чтобы создать такое излучение в среде.

Сначала рассмотрим как происходит образование излучения Черенкова-Вавилова и почему мы не можем его наблюдать при скоростях, меньших, чем фазовая скорость света в веществе.

Когда частица пролетает в веществе, она ионизирует атомы в нем. Атомы не могут находиться в возбужденном состоянии продолжительное время. Поэтому далее происходит переход атомов из возбужденного состояния в основное. При этом переходе испускаются гамма-кванты, которые являются излучением Черенкова-Вавилова. Это означает, что каждая точка пути частицы является источником излучения, которое распространяется во все стороны (подробнее смотрим список литературы пункт 5).

Но почему же мы не наблюдаем этот эффект при скоростях, меньших фазовой скорости света? Ответ очень простой. Действительно, если заряженная частица движется в среде сравнительно медленно, то каждая новая точка траектории частицы является источником излучения, но так как создаваемое излучение когерентно, то каждый следующий источник гасит предыдущий.

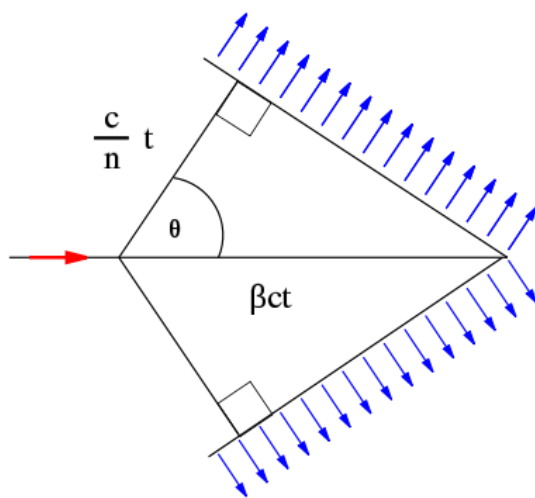


Рисунок 1. Геометрическое объяснение образования излучения Черенкова-Вавилова.

Теперь рассмотрим механизм образования излучения Черенкова-Вавилова, чтобы впоследствии воспользоваться этим при рассмотрении эксперимента.

Пусть частица летит в среде с показателем преломления n со скоростью

$$v = \beta c \quad (1)$$

($\beta = \frac{v}{c} > \frac{1}{n}$) и за время t пролетает расстояние

$$L = \beta c t \quad (2)$$

В то же время, так как скорость частицы превышает фазовую скорость света в данной среде, то образуется излучение Черенкова-Вавилова. Излучение расходится конусом вокруг траектории движения частицы. Угол при вершине конуса зависит от скорости частицы и от скорости света в среде. Так как мы знаем, с какой скоростью распространяется свет в данном веществе и знаем время, которое летела частица, мы находим расстояние, которое пролетел свет. Построив треугольник, (в пространстве строится конус) получаем (см. рисунок 1), что

$$\cos(\theta) = \frac{1}{\beta n} \quad (3)$$

Зная угол и показатель преломления среды, мы можем посчитать скорость движения частицы.

Для дальнейшего изучения нам понадобится нечто большее, т.е. система детекторов, позволяющая узнать намного больше о частице, ее характеристиках и направлении прихода.

4. Определение характеристик частицы

Для того, чтобы узнать побольше о частице, которую мы исследуем, нам понадобится система детекторов. Необходима четкая схема, тем более поверхность Европы позволяет поставить детекторы так, как мы этого хотим. Поскольку в данном эксперименте мы ограничены лишь поверхностью спутника, значит, нам необходима симметричная система, иначе вычисления будут слишком трудные. Идеальным вариантом является система в виде правильного шестиугольника с датчиком в центре. Почему? Ответ очевиден: расстояние между всеми датчиками будет одинаковым, что существенно упростит вычисления и позволит наиболее точно вычислить траекторию частицы и ее характеристики.

Следующий вопрос – это расстояние между датчиками. Вообще говоря, мы можем поставить датчики на любом расстоянии друг от друга, но для наиболее комфортного изучения это расстояние должно соответствовать каким-то характеристикам, позволяющим пользоваться ими при обработке данных результатов. Для этого следует принять во внимание, что лед является поглощающим веществом, и при прохождении света через лед его интенсивность падает. Зависимость интенсивности излучения от пройденного им расстояния x в поглощающем веществе дается законом Бугера — Ламберта — Бера:

$$I(x) = I_0 e^{-xk_\lambda} \quad (4)$$

Где k_λ – показатель поглощения.

Отсюда следует, что если пройденное расстояние будет обратно пропорционально показателю поглощения среды, то интенсивность света будет падать в e раз. Из геометрических соображений видно, что если расстояние между датчиками одинаковое, то разность расстояний, которые пролетает свет до каждого следующего датчика, будет одинаковой. Таким образом, расстояние между датчиками должно соответствовать изменению интенсивности в кратное числу e раз.

Итак, с видом системы и ее характеристиками мы разобрались, теперь необходимо определить характеристики частицы. Начнем с нахождения траектории частицы.

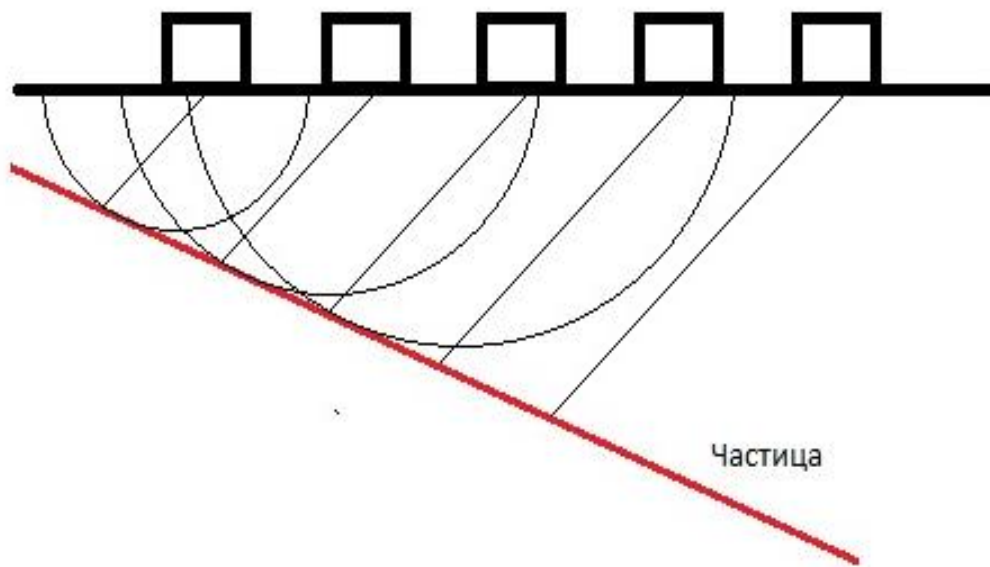


Рисунок 2. Восстановления картины явления по отклику датчиков.

Имея очень большую систему датчиков, мы можем достаточно точно определить траекторию частицы. Пусть в начальный момент времени первый датчик зарегистрировал излучение. Тогда через время t_1 второй датчик также зарегистрирует излучение. Зная это время и скорость распространения излучения в данной среде, мы строим полусферу в плоскости под датчиком. Далее делаем то же самое, вычисляя время, через которое каждый датчик откликается на присутствие излучения. Построив систему сфер, мы проводим касательную к ним и получаем возможные траектории частиц (см. рисунок 2). Чем больше датчиков мы имеем, тем точнее мы определим траекторию полета частицы. Знание траектории нам очень поможет при определении остальных характеристик.

Следующей характеристикой, которую мы можем определить, является заряд частицы.

Теория Тамма-Франка дает выражение для числа фотонов N , испускаемых частицей с зарядом Z , движущейся со скоростью β в среде с показателем преломления n в интервале длин волн от λ_1 до λ_2 :

$$N = 2\alpha x Z^2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) (\sin(\theta))^2 \quad (5)$$

где α - постоянная тонкой структуры ($\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = 1/137$) и x - длина пути частицы.

Согласно формуле 5, число фотонов, излучаемых частицей с зарядом Z на единице длины пути в веществе с постоянным показателем преломления, составляет

$$N \approx 500Z^2 (\sin(\theta))^2 \quad (6)$$

Следовательно, зная угол θ и число фотонов, испускаемых на единицу длины пути, мы можем найти заряд частицы, воспользовавшись формулой 6. Но, как посчитать число фотонов?

Этот вопрос оказывается достаточно сложным, так как свечение идет во все стороны, но мы не можем окружить частицы детекторами. Детектор позволяет посчитать лишь то количество фотонов, которое до него дошло. Зная размеры детектора, мы сможем посчитать количество фотонов, которое приходится на единицу длины пути. Теперь надо просто проинтегрировать это число по всем направлениям распространения излучения и в результате мы получим конечное число фотонов, которое испускается частицей на единицу длины пути. Теперь мы сможем найти заряд частицы.

Но самой важной характеристикой частицы является ее энергия. И вот здесь мы сталкиваемся с тем, что энергия частицы, которую мы можем зарегистрировать напрямую, зависит от количества датчиков и расстояния между ними. Теория Тамма-Франка дает выражение для суммарной энергии, испускаемой частицей на единицу пути:

$$\frac{dE}{dx} = \alpha Z^2 \int_{\omega_1}^{\omega_2} \mu \omega (\sin(\theta))^2 d\omega \quad (7)$$

Но нужно принять во внимание, что магнитная проницаемость μ и угол θ зависят от частоты фотона ω , что усложняет взятие интеграла. Хотя, так как практическое значение имеет лишь излучение, лежащее в видимой части света, мы можем пренебречь этими зависимостями и тогда, взятие интеграла становится достаточно простым.

Но это все теория. Как же мы сможем посчитать энергию на практике. В этом нам поможет знание нашей системы датчиков, и траектория частицы. Для нахождения энергии частицы есть одно необходимое условие: частица должна закончить излучать в области видимости системы датчиков. Это означает, что мы сможем исследовать только частицы, обладающие небольшой энергией.

Для начала нам необходимо определить, какое расстояние пролетела частица. Зная траекторию частицы, мы сможем определить точку, в которой частица начала излучать, а, зная, в какой точке она перестала излучать, мы определим расстояние, на котором она излучала. Для определения конечной точки излучения нам необходимо, чтобы последним откликнулся датчик, который не является последним в цепочке датчиков, тогда, с

точно до расстояния до следующего датчика, мы определим конечную точку. Теперь, зная расстояние на котором частица излучает и зная, какое количество энергии частица тратит на излучение, мы сможем определить сколько она потеряла всего энергии, то есть ее первоначальную энергию.

В результате эксперимента мы получим величины с достаточно серьезными погрешностями, о чем свидетельствуют формулы для погрешностей (см. приложение), но в данном эксперименте мы сделали все возможное для уменьшения влияния внешних факторов на наши расчеты.

4. Заключение

В данной работе изучались перспективы использования спутника Юпитера - Европы для изучения космических лучей по излучению Черенкова-Вавилова.

Был предложен вид системы детекторов для изучения характеристик космических лучей, а также предложен способ расчета параметров системы.

Были предложены методы для нахождения траектории частицы и ее основных характеристик, таких как скорость, заряд и энергия.

Использование поверхности Европы для изучения космических лучей представляется весьма перспективной задачей, так как ее свойства позволяют проводить эксперименты, невозможные на Земле. Более того, в процессе изучения космических лучей, имеется возможность побольше узнать о самой Европе, ведь в Солнечной системе не так много имеется объектов, покрытых льдом, под которым возможно нахождение океана и даже жизнь. Эксперименты, основанные на изучении космических лучей, имеют огромную практическую ценность, так как космические лучи несут в себе информацию о среде, в которой они зародились, что очень интересно с точки зрения истории Вселенной и ее состоянии на ранних этапах.

Данный эксперимент позволяет напрямую исследовать космические лучи, без посредников в виде широкого атмосферного ливня на Земле, когда мы вынуждены исследовать на сами лучи, а результат взаимодействия частицы с атмосферой.

К сожалению, в ближайшие годы не планируется экспедиций к Европе, вплоть до середины 2020 годов, но актуальность данного эксперимента дает надежду на то, что данный проект может быть осуществлен, возможно, вместе с другими исследованиями Европы. Результаты, полученные с помощью данного эксперимента могут открыть новые факты о космических лучах и послужить начальной точкой для новой революции в физике частиц и астрофизике.

5. Приложение

5.1. Расчет погрешностей в измерении величин.

Общеизвестно, что в любом эксперименте есть погрешности, и данный эксперимент не является исключением. Датчики неидеальны и нам нужно учесть это в наших расчетах. Пусть датчики имеют погрешность в измерении времени, частоты и направлении излучения. Выясним, как это влияет на определение заряда и энергии первичной частицы.

Пусть погрешности времени частоты и направления равны соответственно $\Delta t, \Delta \omega, \Delta \theta$. Тогда воспользуемся стандартными формулами для вычисления погрешностей:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial t} \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \omega} \Delta \omega\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \theta} \Delta \theta\right)^2} \quad (8)$$

$$\Delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial t} \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial \omega} \Delta \omega\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial \theta} \Delta \theta\right)^2} \quad (9)$$

Далее необходимо расписать частные производные и подставить в данные формулы, в результате чего мы получим

$$\begin{aligned} \Delta E &= \sqrt{\left(\frac{q^2 \omega^2 \mu c \beta (\sin(\theta))^2}{8\pi} \Delta t\right)^2 + \left(\frac{q^2 \omega \mu c \beta t (\sin(\theta))^2}{4\pi} \Delta \omega\right)^2 + \left(\frac{q^2 \omega^2 \mu c \beta t \sin(2\theta)}{8\pi} \Delta \theta\right)^2} = \\ &= \frac{q^2 \omega \mu c \beta}{4\pi} \sqrt{\left(\frac{\omega (\sin(\theta))^2}{2} \Delta t\right)^2 + \left(t (\sin(\theta))^2 \Delta \omega\right)^2 + \left(\frac{\omega t \sin(2\theta)}{2} \Delta \theta\right)^2} \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta q &= \sqrt{\left(\frac{\sqrt{E\pi}}{\omega \sin(\theta) \sqrt{\mu c \beta t^3}} \Delta t\right)^2 + \left(\frac{2\sqrt{E\pi}}{\omega^2 \sin(\theta) \sqrt{\mu c \beta t}} \Delta \omega\right)^2 + \left(\frac{\cos(\theta) \sqrt{E\pi}}{\omega (\sin(\theta))^2 \sqrt{\mu c \beta t}} \Delta \theta\right)^2} = \\ &= \frac{\sqrt{E\pi}}{\omega \sin(\theta) \sqrt{\mu c \beta t}} \sqrt{\left(\frac{1}{t} \Delta t\right)^2 + \left(\frac{2}{\omega} \Delta \omega\right)^2 + (ct g(\theta) \Delta \theta)^2} \quad (11) \end{aligned}$$

Список литературы

1. Мурзина Е.А. Взаимодействие излучения высокой энергии с веществом.-М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990.
2. Л. И. Мирошниченко: Космические лучи, "Физика Космоса", 1986
<http://www.astronet.ru/db/msg/1188396>
3. Н.Н. Калмыков, Г.В. Куликов, Т.М. Роганова, НИИЯФ МГУ: МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
http://vvkuz.ru/books/lectures_1/02.pdf
4. Icecube <https://icecube.wisc.edu/>
5. Cerenkov, P.A. (1937). "Visible Radiation Produced by Electrons Moving in a Medium with Velocities Exceeding that of Light"
6. Космические лучи <http://nuclphys.sinp.msu.ru/elp/elp09.htm>
7. С. В. Мурзин. Введение в физику космических лучей. Москва, М.: Атомиздат, 1979.