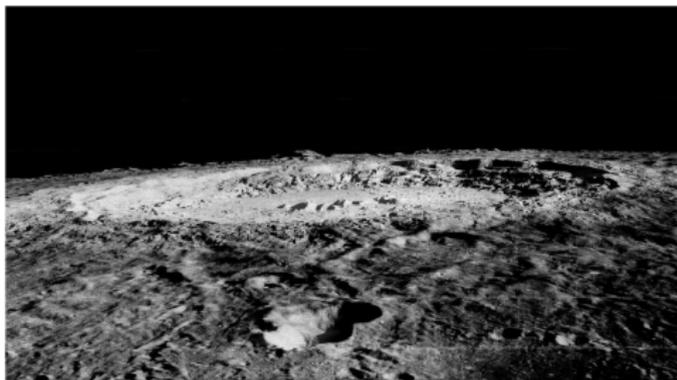


МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра физики частиц и космологии
Курсовая работа

по теме:

Частицы сверхвысоких энергий и лунный грунт



Выполнил
студент 2 курса гр. 217
Краснов И. В.
Научный руководитель
Горбунов Д. С.

Введение

Лунный грунт

Частицы

Изотопы

Уничтожение

Плавление

Параметры
расплавленной
области

Метеориты

Q-шары

Заключение

Список
литературы



Введение

Космические лучи – источник знания о взаимодействиях частиц высоких энергий природного происхождения.

Введение

Лунный грунт

Частицы

Изотопы

Уничтожение

Плавление

Параметры
расплавленной
области

Метеориты

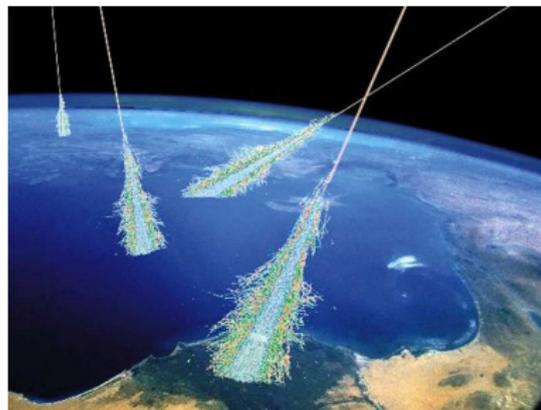
Q-шары

Заключение

Список
литературы



Энергия столкновений БАК:
14 ТэВ



Энергия космических лучей:
до 10^{20} эВ

До сих пор ученые могли изучать лишь каскады вторичных частиц, образующиеся в результате взаимодействия космических лучей с атмосферой. Взаимодействие космических лучей с твердой поверхностью небесных тел является неизученным явлением и может открыть новые перспективы как для изучения “обычных” частиц сверхвысоких энергий, так и гипотетических Q- шаров и нуклеаритов.



Лунный грунт

Введение

Лунный грунт

Частицы

Изотопы

Уничтожение

Плавление

Параметры
расплавленной
области

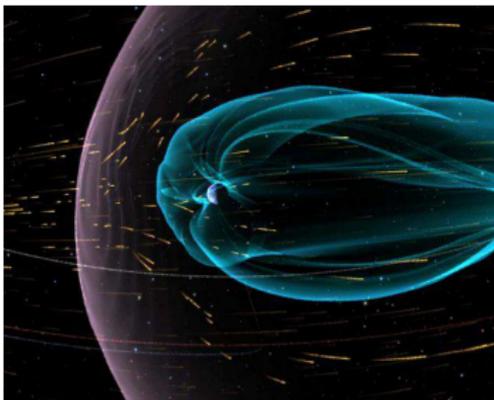
Метеориты

Q-шары

Заключение

Список
литературы

Отсутствие атмосферы и магнитного поля, слабая сейсмическая активность делает Луну привлекательным объектом для подобных исследований.



Магнитное поле защищает
Землю от жесткого
излучения



Луна своего поля не имеет и
находится дальше от Земли,
чем ее магнитные пояса.

Изменения в кристаллической решетке заключаются в следующем:

- меняется изотопный состав
- узлы решетки уничтожаются в сильных взаимодействиях
- вещество плавится под воздействием мягких фотонов.



Введение

Лунный грунт

Частицы

Изотопы

Уничтожение

Плавление

Параметры
расплавленной
области

Метеориты

Q-шары

Заключение

Список
литературы

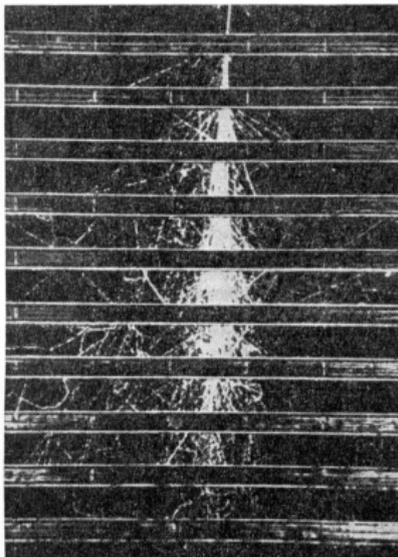
Измерение изотопного состава не может быть произведено “на месте” и потребует забора образцов грунта с больших глубин, что представляет весьма сложную техническую задачу. Кроме того, изменение изотопного состава, инициированное космическим лучом высоких энергий не отличить от инициированного низкоэнергетическими космическими лучами или солнечным ветром. Высокие энергии характеризуются большей глубиной залегания в сравнении с малыми, но это, как отмечалось выше, представляет из себя весьма сложную техническую задачу. Поэтому в данной работе изменение изотопного состава не исследовалось.





Уничтожение

В результате взаимодействия с высокоэнергетичной частицей ядро кристаллической решетки приобретает импульс, т.е. выбивается из своего положения в кристаллической решетке. Если несколько соседних узлов выбиваются в таком процессе, то в кристаллической решетке образуется полость. Форма полости будет иметь соответствующий вид: “веретено”, утолщающееся к середине и заостряющееся к концам.



Уничтожение будет идти неравномерно, поэтому в реальности ожидается увидеть совокупности микроскопических полостей, образующие конгломерат, тяготеющий к оси распространения ливня. В данном способе наблюдается сравнительно малая концентрация частиц, вызывающих регистрируемые изменения решетки, относительно случая плавления мягкими частицами.



Введение

Лунный грунт

Частицы

Изотопы

Уничтожение

Плавление

Параметры
расплавленной
области

Метеориты

Q-шары

Заключение

Список
литературы

Частицы высоких энергий при взаимодействии с веществом рождают несколько вторичных частиц, с энергиями на пару порядков меньшими в сравнении с энергией первичной частицы. Энергия, передаваемая кристаллической решетке вещества в этом случае невелика. Куда эффективнее идет передача энергии от “мягких” частиц. Но из-за малой величины энергии таких частиц, для того, чтобы расплавить один и тот же объем вещества, нужна куда большая их концентрация в данном объеме, в сравнении с случаем высокоэнергетичных частиц. Формула для расчета минимального для начала плавления потока $\Phi(\omega)$ в зависимости от энергии $\hbar\omega$ в случае облучения параллельным пучком, нормально влетающим в область площадью сечения Σ толщиной s вещества с плотностью ρ и удельными теплоемкостью C и теплотой плавления L :

$$\Phi(\omega) = \rho \cdot c \cdot (L + C\Delta T) \frac{1}{\mu(\omega) \cdot \hbar\omega \cdot s}, \quad (1)$$

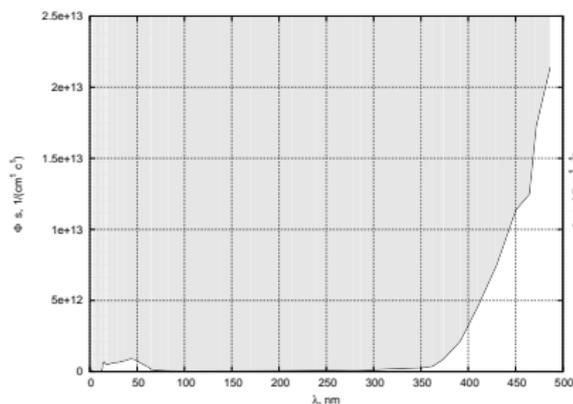
где c - скорость света в веществе, $\mu(\omega)$ – коэффициент поглощения, характерный для данной частоты ω .



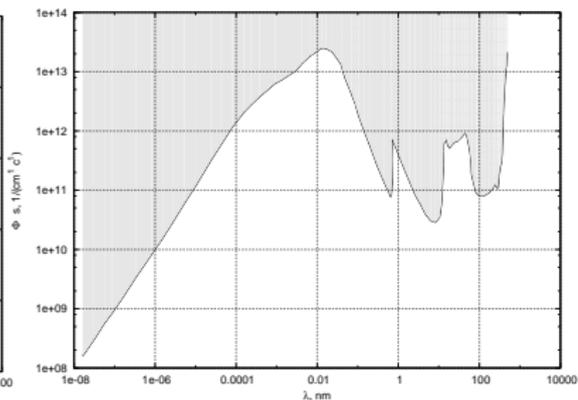
Плавление

$\Delta T = T_{\text{ПЛ}} - T_0$ – разность температуры плавления $T_{\text{ПЛ}}$ вещества и начальной температуры на глубине образования “полости”.

Начиная с 1 м она не меняется с глубиной и равняется $T_0 = -15^\circ\text{C} = 258\text{K}$.



Обычный масштаб



Логарифмический масштаб

Рис.: График зависимости величины потока Φ_{min} , необходимого для начала плавления, помноженного на толщину плавящейся области s , от длины волны λ . Цветом на графике выделена область значений потока, при которых идет плавление вещества



Введение

Лунный грунт

Частицы

Изотопы

Уничтожение

Плавление

Параметры
расплавленной
области

Метеориты

Q-шары

Заключение

Список
литературы

Из графиков видно, что лучше всего плавление будет идти в мягком рентгене ($\lambda = 5\text{--}15$ нм) и ультрафиолете ($\lambda = 70\text{--}350$ нм). Передача энергии для γ -квантов и жесткого рентгена идет недостаточно интенсивно вкупе с малым значением их потока. Свет видимого диапазона несет слишком мало энергии и, вследствие этого, для получения эффекта должен иметь куда больший поток.

Используя это выражение получаем критерий проверки факта плавления реальными, некогерентными фотонами с распределением $f(\omega) = \frac{dN}{d\omega}$ по энергиям:

$$\int_0^{\infty} f(\omega) \cdot \frac{\Phi(\omega)}{\Phi_0(\omega)} d\omega \geq 1. \quad (2)$$



Параметры расплавленной области

Введение

Лунный грунт

Частицы

Изотопы

Уничтожение

Плавление

Параметры расплавленной области

Метеориты

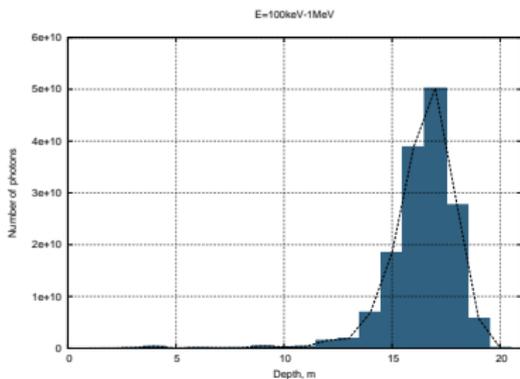
Q-шары

Заключение

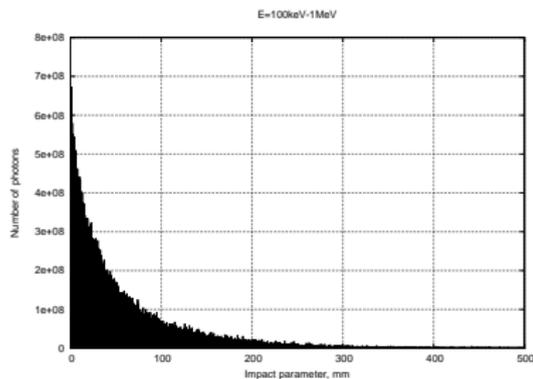
Список литературы

Для оценки параметров полости было проведено моделирование формирования ШАЛ от первичного протона с энергией 10^{20} эВ в веществе с плотностью: 2 г/см^3 .

Как видно из графика ниже, максимальное количество фотонов наблюдается на глубине 17 м. Примерно на этой глубине и должно начаться плавление, но максимум его будет наблюдаться, когда фотоны наблюдаемого диапазона энергий породят множество вторичных фотонов “энергий плавления”



а)



б)

Рис.: Распределение фотонов а) по глубине, б) по значению прицельного параметра на глубине 17 м.



Введение

Лунный грунт

Частицы

Изотопы

Уничтожение

Плавление

**Параметры
расплавленной
области**

Метеориты

Q-шары

Заключение

Список
литературы

Если рассмотреть распределение фотонов по прицельному параметру, то становится видно, что эффективно поглощение идет в нескольких десятках сантиметров вдоль оси, с резким максимумом вдоль нее.

Вид “полости” определяется особенностями ее формирования: так как мягкие частицы образуются по краям ливня, то плавление на оси распространения ливня начнется позже в сравнении с его периферией. В дальнейшем форма полости будет примерно соответствовать форме ливня, утончаясь при затухании к ее концу.

Объем такой полости можно оценить по суммарной энергии:
 $V \sim 10^{-3} \text{мм}^3$.

Столь малая величина говорит нам о том, что только на оси, в максимуме поглощения, концентрация фотонов действительно будет достаточной для плавления.



Введение

Лунный грунт

Частицы

Изотопы

Уничтожение

Плавление

Параметры
расплавленной
области

Метеориты

Q-шары

Заключение

Список
литературы



Оценка времени экспозиции определяется кратерообразованием. Общая площадь поверхности Луны оценивается [2] в $3.79 \times 10^{13} \text{ м}^2$.

Площадь кратеров, образующихся от метеоритов массой от 1 кг в течение года $S_{\text{кратеров}} \approx 0.3 \times 10^6 \text{ м}^2$.

Вероятность случайно выбранной точки поверхности Луны быть “испорченной” метеоритом в ближайший год равняется:

$$P = \frac{S_{\text{кратеров}}}{S_{\text{Луны}}} = \frac{0.3 \times 10^6 \text{ м}^2}{3.79 \times 10^{13} \text{ м}^2} \simeq 7.69 \times 10^{-9}. \quad (3)$$



Введение

Лунный грунт

Частицы

Изотопы

Уничтожение

Плавление

Параметры
расплавленной
области

Метеориты

Q-шары

Заключение

Список
литературы

Будем считать результат достоверным, если вероятность его “порчи” составляет менее 5%. Тогда получаем оценку времени накопления информации:

$$\tau \lesssim \frac{0.05}{7.69 \times 10^{-9} \text{лет}^{-1}} = 6.5 \times 10^6 \text{лет} = 6.5 \text{ млн. лет.} \quad (4)$$

Данная оценка позволяет установить время накопления статистики взаимодействия лунной поверхности с космическими лучами.

Сделанная оценка времени экспозиции также может позволить оценить поток Q- шаров.



Q-шары

Введение

Лунный грунт

Частицы

Изотопы

Уничтожение

Плавление

Параметры
расплавленной
области

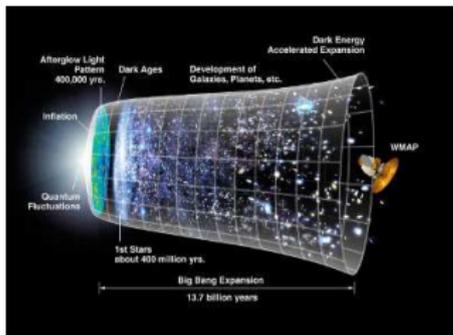
Метеориты

Q-шары

Заключение

Список
литературы

Суперсимметричные обобщения СМ предсказывают существование нетопологических солитонов, получивших название “Q-шары”. Такие объекты могут обладать рядом интересных свойств. В частности, солитоны с большим барионным числом являются полностью стабильными и могли в большом количестве рождаться в ранней Вселенной. Макроскопические сгустки кварковой материи, оставшиеся с космологического кварк-адронного фазового перехода, обычно называются кварковыми наггетами (quark nuggets), а если они сталкиваются с Землей их иногда также называют нуклеаритами (nuclearites).





Q-шары

Введение

Лунный грунт

Частицы

Изотопы

Уничтожение

Плавление

Параметры
расплавленной
области

Метеориты

Q-шары

Заключение

Список

литературы

Существующие ограничения:

MACRO: $\Phi < 1.1 \times 10^{-14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ (для частиц с массой от 10^{13} до 10^{22} ГэВ, уровень достоверности 90%)

ANTARES: $\Phi < 1 \times 10^{-16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ (для частиц с массой от 10^{14} до 10^{17} ГэВ, уровень достоверности 90%)

изучение земных глубоко залегающих пород:

$\Phi < 1 \times 10^{-19} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ (для частиц с массой от 10^{13} до 10^{26} ГэВ, уровень достоверности 90%).

Наш метод позволит получить при обследовании ста кв. м.

лунной поверхности следующую оценку потока:

$\Phi = 7.7 \times 10^{-24} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$. Нижнее ограничение на диапазон

масс Q- шаров и нуклеаритов, которые могут быть

зарегистрированы нашим методом ставится по диаметру

исследуемой частицы, который должен быть не меньше периода

кристаллической решетки вещества (5-8 Å). Плотность таких

образований определяется используемой моделью их строения,

поэтому нижнее ограничение на массу также определяется ею.

Верхнее ограничение ставится по количеству темной материи во

Вселенной. Для указанного выше примера оно составляет 10^{28}

ГэВ. Уровень достоверности – 95%.



Заклучение

Введение

Лунный грунт

Частицы

Изотопы

Уничтожение

Плавление

Параметры
расплавленной
области

Метеориты

Q-шары

Заклучение

Список

литературы

В данной работе изучались перспективы использования лунной поверхности как детектора частиц сверхвысоких энергий, а также Q- шаров и нуклеаритов.

Было предложено 2 вида наблюдаемых дефектов кристаллической решетки, вызываемых прохождением каскада вторичных частиц в твердом теле – разрушение и плавление.

Метод плавления был признан более перспективным и рассмотрен более подробно.

Был получен критерий, с помощью которого, зная распределение фотонов, образовавшихся в результате взаимодействия вторичных частиц с веществом, по энергиям и по глубине, можно построить картину образовавшихся в веществе расплавленных “полостей”.

Были оценены форма, вид, объем, глубина залегания расплавленных областей вещества: микроскопические иглообразные “полости” $V \sim 10^{-3} \text{мм}^3$, залегающие на глубине порядка 20 м, образовать которые могут только космические лучи сверхвысоких энергий.

Была проведена оценка времени экспозиции, уровень достоверности 95%: $\tau = 6.5$ млн. лет.



Заключение

Введение

Лунный грунт

Частицы

Изотопы

Уничтожение

Плавление

Параметры
расплавленной
области

Метеориты

Q-шары

Заключение

Список

литературы

Отдельно можно отметить, что данные расчеты могут быть применены и к другим небесным телам. Например к Европе, 6-му спутнику Юпитера, чья поверхность представляет из себя многокилометровый слой льда. Низкая плотность, температура и удельная теплота плавления позволят плавиться на порядки большим областям. С другой стороны, за счет сравнительно молодого возраста поверхности, время экспозиции также будет сравнительно невелико.



Использование поверхности Луны для обнаружения и изучения свойств частиц сверхвысоких энергий и гипотетических Q- шаров и нуклеаритов представляется весьма перспективной задачей.



Список литературы

Введение

Лунный грунт

Частицы

Изотопы
Уничтожение

Плавление
Параметры
расплавленной
области

Метеориты

Q-шары

Заключение

Список
литературы

-  Л. И. Мирошниченко: *Космические лучи*, “Физика Космоса”, 1986 <http://www.astronet.ru/db/msg/1188363>
-  К. Б. Шингарёва: *Луна*, “Физика Космоса”, 1986 <http://www.astronet.ru/db/msg/1188396>
-  R. M. Suggs, D. E. Moser, W. J. Cooke, R. J. Suggs: *The Flux of Kilogram-sized Meteoroids from Lunar Impact Monitoring*
-  J. Beringer et al. (Particle Data Group): *Review of particle physics*, Phys. Rev. D 86, 010001 (2012)
-  P. B. Price: *Limits on contribution of cosmic nuclearites to galactic dark matter*, Phys. Rev. D 38, 3813 (1988)