

УДК 523.44:539.1.074

Возможность применения методов мюонной томографии для исследования малых планет

Инжечик Лев Владиславович

inzhechik.lv@mipt.ru

SPIN-код: 3532-1797

Сенкевич Александр Павлович

senkevich.ap@mipt.ru

SPIN-код: 1664-4641

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

Аннотация. Мюонная томография геологических структур основана на измерении потоков космических мюонов, прошедших сквозь толщу изучаемых объектов. Энергичные мюоны, входящие в состав космических лучей, обладают высокой проникающей способностью и их подземные потоки несут информацию о плотности горных пород, расположенных выше детекторов этих мюонов. Технология мюонной томографии геологических структур используется для построения 3D-профиля плотности подземных структур, таких как месторождения минералов и металлов, воздушные пустоты, пещеры и другие структуры.

Ключевые слова: Мюонная томография, разведка полезных ископаемых, астероиды, космические лучи, детекторы мюонов, 3D-моделирование, плотность горных пород, глубинное зондирование.

Мюонная томография геологических структур основана на измерениях потоков космических мюонов, прошедших сквозь толщу изучаемых геологических пород [1]. Энергичные мюоны, возникают при взаимодействии с веществом космических лучей [2], которые приходят из дальнего космоса и имеют различный состав и энергию [Рис.1], полученные мюоны обладают высокой проникающей способностью и проходя через среду их потоки несут информацию о поглощающей способности горных пород, расположенных выше детекторов этих мюонов [3]. Регистрация мюонов технически возможна на глубинах вплоть до 1,5 км. Однако реально метод мюонной томографии может быть эффективен примерно до глубин порядка 1 км [4].

Технология мюонной томографии геологических структур используется для картографирования интенсивности поглощения энергии мюонов под землей и строит подробные 3D-профили плотности подземных аномалий, таких как месторождения минералов и металлов, воздушных пустот, пещеры и другие структуры. Она поможет геологам точно и уверенно определять месторождения минералов и металлов, снизит риски и затраты, экономя время и сводя к минимуму воздействие разведки на окружающую среду.

Для проведения мюонной томографии необходимы:

- детекторы, чувствительные к направлению траектории мюона;
- алгоритм обработки сигналов детекторов, обеспечивающий максимально точное определение зенитного и азимутального углов траектории зарегистрированного мюона;

– алгоритм собственно томографии — расчет 3D-карты распределения горных пород на основе нескольких локальных функций углового распределения потока мюонов, которые измерены детекторами, расположенными ниже исследуемого горного массива [5].

Лаборатория методов ядерно-физических экспериментов (ЛМЯФЭ) МФТИ обладает опытом разработки подземных детекторов мюонов. ЛМЯФЭ ведет разработку современных математических методов и информационных технологий для моделирования процессов регистрации мюонов, алгоритмов обработки сигналов детекторов различного типа и математических методов томографии. На основе этого разрабатывается оптимальная конструкция скважинного цилиндрического детектора и создается эффективная система геологической мюонно томографии на основе цилиндрических детекторов подземных потоков космических мюонов, пригодных для размещенных в буровых скважинах.

На основании указанного выше создается программно-аппаратный комплекс на базе сцинтилляторов детекторов и вычислительных средств восстановления 3D-подповерхностных объектов на глубинах до 1 км.

Применение методов мюонной томографии в открытом космосе. На малых космических телах нет атмосферы и потоки мюонов будут рождаться на метровых расстояниях, при падении высокоэнергетических частиц космического излучения на поверхность космических тел. Так как космическое излучение равномерно распределено со всех направлений, детекторы возможно располагать на поверхности малых тел или на небольшом расстоянии от тела, так как самой космических частиц будет не много то детекторы позволят отсортировать, то что летит с наружи от того что летит с астероида, при этом ливни которые порождаются будут состоять их множества мюонов, приходящих с направления от астероида. Используя детекторы на совпадения, можно исключить события относящиеся, как солнечной составляющей, так и тех что падают сверху от астероида.

Энергичные мюоны, входящие в состав космических лучей, обладают высокой проникающей способностью и их подземные потоки принесут информацию о поглощающей способности горных пород, расположенных ниже детекторов этих мюонов.

Разместив несколько детекторов или один [Рис.2], но сменяя пространственное положение, а также сделав скан внешней поверхности и связав ее в пространственную модель, можно получить мюонную томографию геологических структур тела, используя измерения потоков мюонов, прошедших сквозь толщу изучаемых геологических пород. Регистрация мюонов технически возможна на глубинах вплоть до 2 км.

Данные измерения позволяют:

- выяснить геологическую структуру тела с исследованием поверхности и ее состава привязать к составу внутренностей астероида, найти тяжелые металлы;

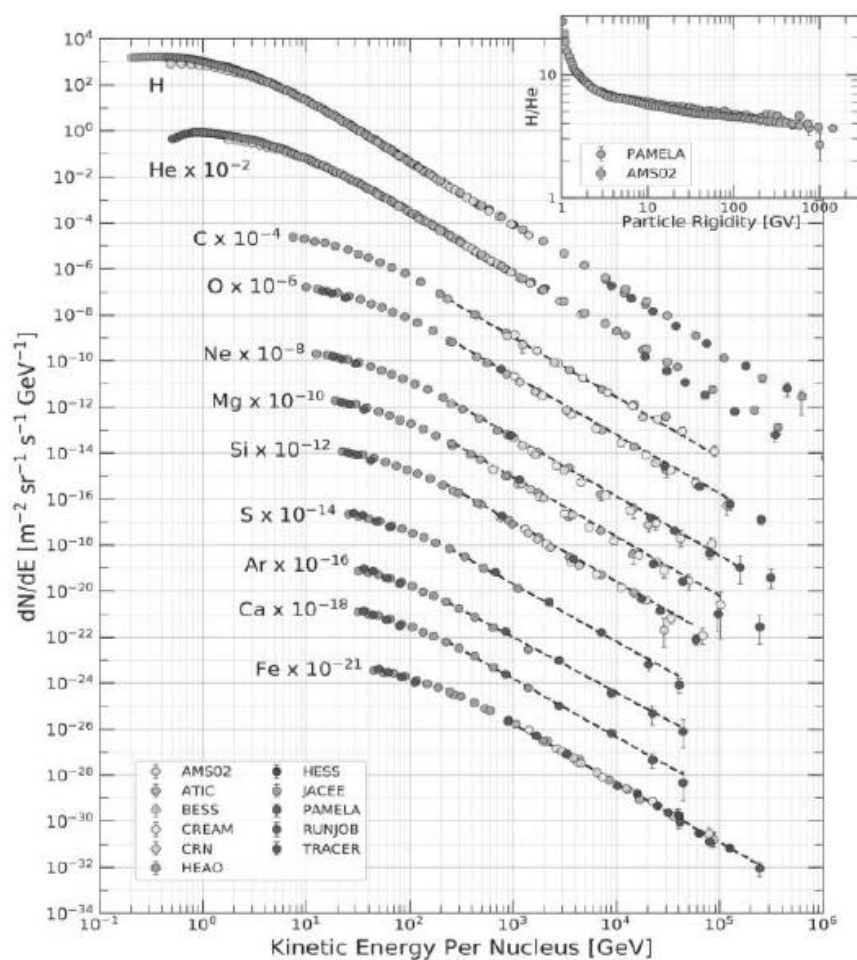


Рис. 1. Кинетический состав космических лучей (количество/энергия)

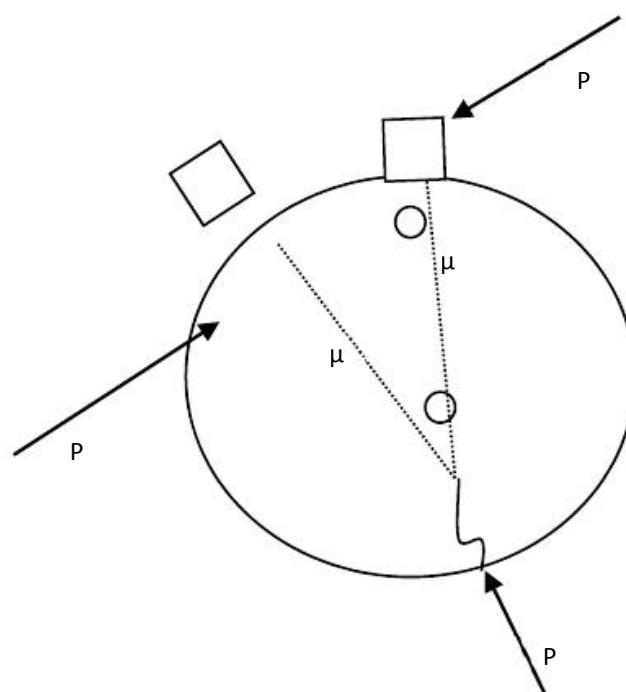


Рис. 2. Пример размещения детектора треков частиц и пример их прохождения через моделируемое тело

- найти возможные полости в астероиде пригодные для размещения оборудования или построения стационарных пунктов;
- построить точную модель тела для его эксплуатации, добычи, или возможного разрушения с корректной орбитой получившихся осколков.

Список источников

- [1] Allkofer O.C. *Grieder PKF Cosmic Rays on Earth. Physics Data*. Karlsruhe, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik GmbH, 1984.
- [2] Adams J.H., Silberberg R., Badhwar G.D. Calculation of the vavilov distribution: A correction. *Nuclear Instruments and Methods*, 1975, vol. 124, iss. 2, pp. 551–556.
- [3] Hivert F., Roche I.L., Decitre J.B., Brunner J., Busto J., Gaffet S. Muography sensitivity to hydrogeological rock density perturbation: roles of the absorption and scattering on the muon flux measurement reliability. *Near Surf. Geophys.*, 2017, vol. 15 (2), art. no. 121.
- [4] Trzaska W.H., Enqvist T., Kuusiniemi P., Słupecki M., Bezrukov L., Lubsandorzhiev B., Inzhechik L., Joutsenvaara J., Loo K. High-multiplicity muon events observed with emma array. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, art. no. 012085.
- [5] Александров А.Б., Владимиров М.С., Галкин В.И., Гончарова Л.А., Грачев В.М., Васина С.Г., Коновалова Н.С., Маловичко А.А., Манагадзе А.К., Окатьева Н.М., Полухина Н.Г., Роганова Т.М., Старков Н.И., Тюков В.Э., Чернявский М.М., Щедрина Т.В. Метод мюонной радиографии для фундаментальных и прикладных исследований. *Успехи физических наук*, 2017, т. 187, № 12, с. 1375–1392.