Оценка содержания высокоэнергичных тритонов в космических лучах

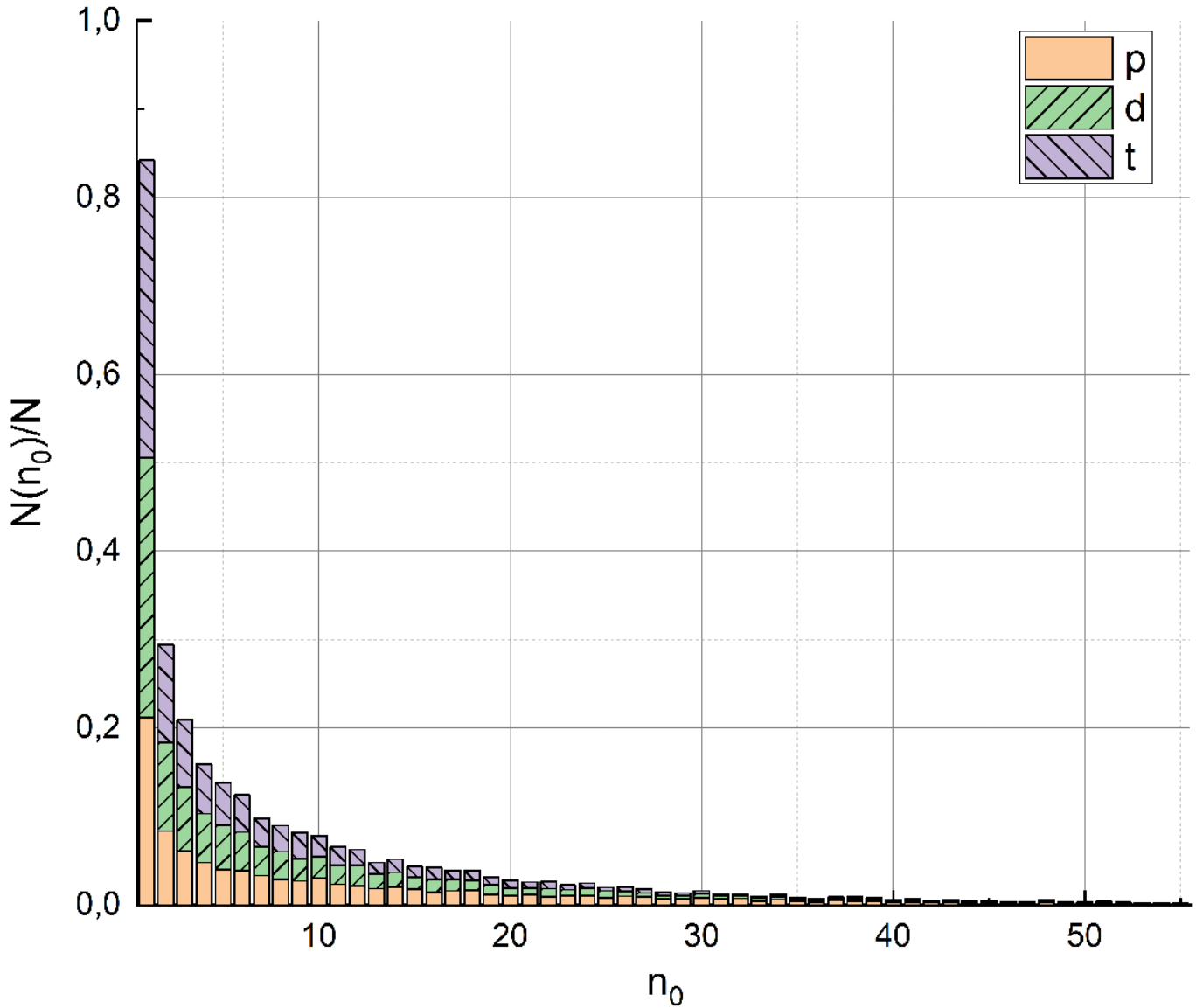
Турундаевский А.Н., Подорожный Д.М., Рахимчанова К.Р.

НИИЯФ МГУ

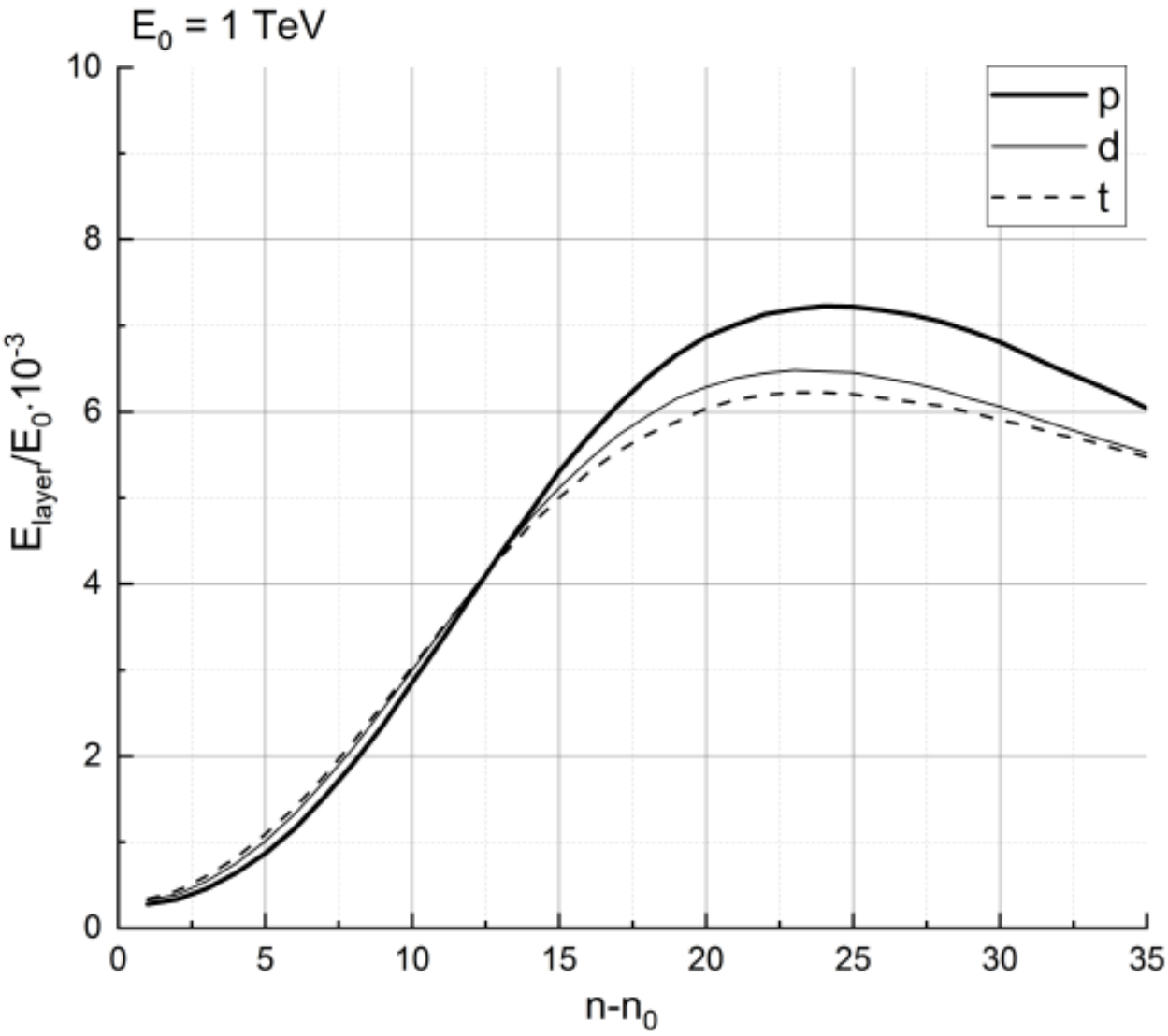
Дейтроны и тритоны могут рождаться во взаимодействиях ядер космических лучей (начиная с водорода) с межзвездным газом. Ранее авторы показали возможность выделения дейтронов в эксперименте СОКОЛ на энергиях ~1 ТэВ. Тогда образование нестабильных тритонов не учитывалось. Однако дальнейший анализ показал, что на таких энергиях время жизни тритонов с учетом лоренц-фактора становится ~10000 лет, что позволяет значительной их части преодолевать межзвездные расстояния. В настоящей работе представлены результаты расчетов образования дейтронов и тритонов при фрагментации на межзвездном газе с учетом спектров космических лучей по данным AMS-02. Показано, что вблизи источников отношение потока тритонов к общему потоку дейтронов и тритонов при одинаковой энергии на частицу может составлять до ~38%. Отношение вблизи Земли зависит от распространения космических лучей. Его измерение позволит существенно улучшить астрофизические модели.

Дейтроны и тритоны могут образовываться при фрагментации ядер космических лучей, включая гелий и более тяжелые элементы. В экспериментах с ионизационными калориметрами (СОКОЛ-2, ОЛВЭ…) измеряется энергия на частицу, поэтому дейтронам с заданной энергией на нуклон соответствуют тритоны с энергией на нуклон в полтора раза меньше. При падающем спектре ядер до фрагментации наблюдаемое отношение тритонов и дейтронов в ~2.7 раза выше, чем при одинаковой энергии на нуклон.
С помощью программы Geant4 было проведено моделирование взаимодействий различных ядер (от гелия до железа) с водородом при энергии 1 ТэВ/н и определен выход дейтронов и тритонов. Для гелия отношение выхода тритонов и суммарного выхода дейтронов и тритонов равно 0.05, для углерода 0.21, для железа 0.23.

Результаты моделирования (GEANT4, QBBC) установки ОЛВЭ. Распределение по глубине первого неупругого взаимодействия



Средние каскадные кривые в зависимости от глубины каскада, отсчитываемой от точки первого неупругого взаимодействия. Анализ данных производится с помощью искусственной нейронной сети. Оказалось, что суммарный поток дейтронов и тритонов от потока протонов отделяется достаточно легко, но отделение тритонов от дейтронов можно лишь при очень высокой статистике.



Происхождение и распространение тритонной компоненты

В экспериментах с ионизационными калориметрами измеряется энергия на частицу. При этом коэффициенты фрагментации в ультрарелятивистском случае почти не зависят от энергии. Данные последних экспериментов (AMS02, НУКЛОН и др.) показали, что на высоких энергиях спектры вторичных и первичных ядер имеют примерно равные показатели. Это означает, что толща вещества, которую проходит частица, определяется веществом вблизи источника. Были сделаны оценки соотношения потоков тритонов и общего потока дейтронов и тритонов, исходя из состава КЛ, измеренного на AMS02.

При учете всех обильных ядер оказалось, что отношение потока тритонов и суммарного потока дейтронов и тритонов рядом с источником составляет 0.38 при одинаковой энергии на частицу.

Однако часть тритонов должна распасться при распространении. Какая часть тритонов дойдет до Земли, зависит от характера распространения. При движении от близких источников вдоль силовых линий магнитного поля основная часть тритонов дойдет. При диффузионном распространении основная часть распадется. Для оценки был использован источник Vela — остаток сверхновой, взорвавшейся 11000 лет назад. За такое время распад трития приведет к тому, что соотношение потоков при энергии 1 ТэВ/ядро будет 0.09. Таким образом, измерение потоков трития даст возможность уточнить модели распространения КЛ.

Далее был аналогично проанализирован список остатков сверхновых в радиусе 1 кпк из статьи [Qing Luo, Bing-qiang Qiao, Wei Liu, Shu-wang Cui, and Yi-qing Guo *ApJ* **930** 82 2022]. Рассматривались два варианта распространения космических лучей. Первый вариант – это распространение вдоль силовых линий. В этом случае время распространения тритонов минимально и определяется просто расстоянием до источника. Доля долетевших тритонов максимальна. Второй вариант – чисто диффузное распространение. Предполагается, что основная часть космических лучей высоких энергий ускоряется в течение короткого времени после взрыва сверхновой. В этом случае всё определяется временем, прошедшим после взрыва. Доля долетевших тритонов минимальна. В таблице для каждого источника приведены максимальные (r_1) и минимальные (r_2) отношения потока тритонов и суммарного потока дейтронов и тритонов при энергии 1 ТэВ на частицу.

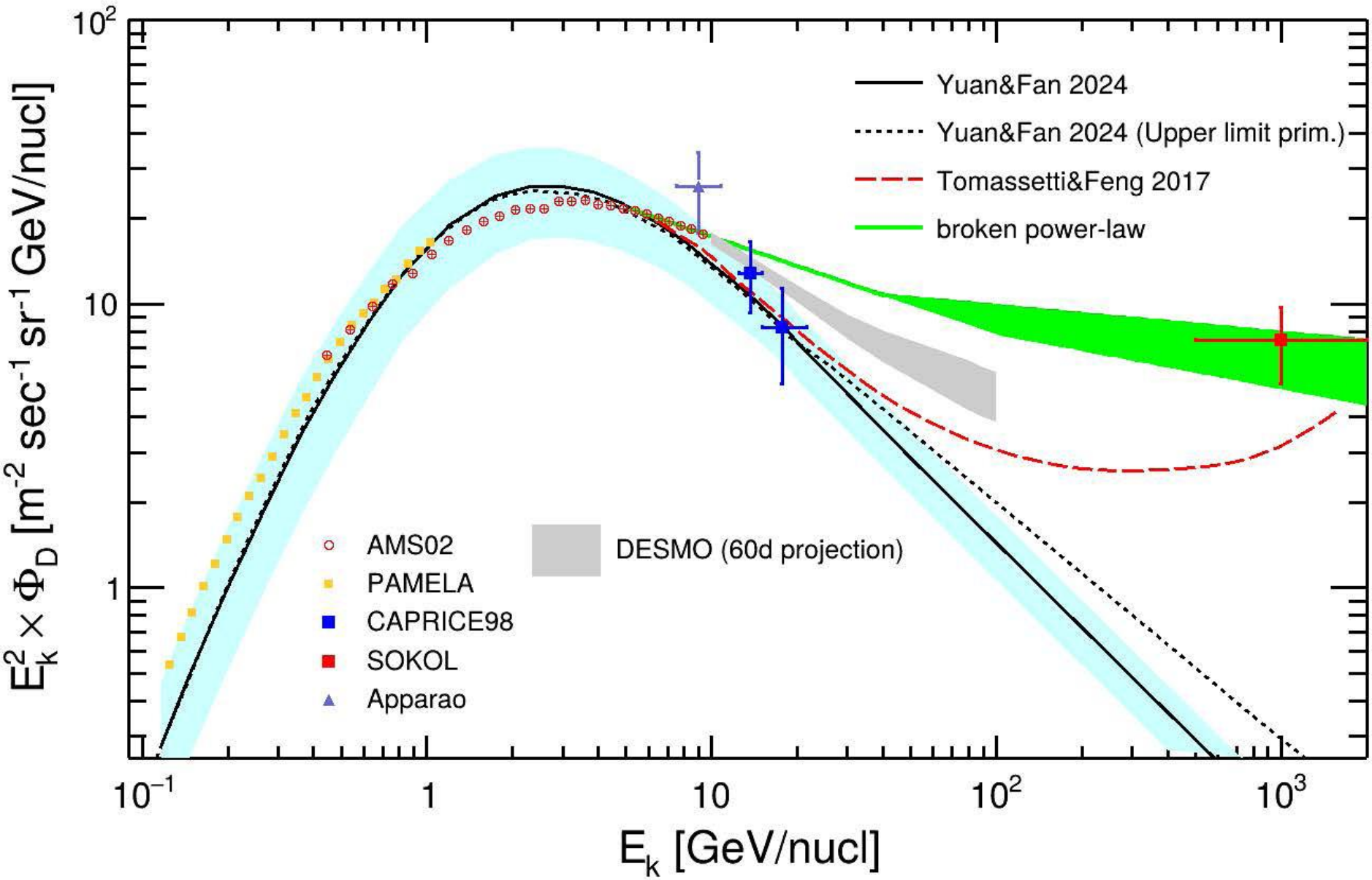
Возможные источники КЛ

SNR		D, кпк	t, тыс.лет	r_1	r_2
G194.3-13.1	Geminga	0.33	345	0.34	0
G65.3+5.7		0.9±0.1	26±1	0.28	0.01
G65.7+1.2	DA 495	1.0±0.4	16.75±3.25	0.27	0.04
G74.0-8.5	Cygnus Loop	$0.54^{+0.10}_{-0.08}$	10±1	0.32	0.11
G114.3+0.3		0.7	7.7±0.1	0.30	0.15
G127.1+0.5	R5	1±0.1	25±5	0.27	0.01
G156.2+5.7		0.8±0.5	10±1	0.29	0.11
G160.9+2.6	HB 9	0.8±0.4	5.5±1.5	0.29	0.20
G203.0+12.0	Monogem Ring	$0.277^{+0.033}_{-0.027}$	86±1	0.35	0
G263.9-3.3	Vela(XYZ)	0.29±0.075	11.2±0.1	0.35	0.09
G266.2-1.2	Vela Jr	0.75±0.01	3.5±0.8	0.29	0.26
G347.3-0.5	SN393	1±0.3	4.9	0.27	0.22

Потоки дейтронов

На рисунке, взятом из [*Dimiccoli F.*, *Follega F. M.* Novel experimental approach to uncover the nature of cosmic-ray deuterium // Phys. Rev. D. — 2025. — Май. — Т. 111, вып. 9. — С.092002], приведены спектры дейтронов по данным различных экспериментов, включая точку эксперимента СОКОЛ-2 [Turundaevskii A., Podorozhnyi D. High energy deuterons in cosmic rays registered by the SOKOL satellite experiment // Advances in Space Research. — 2016. — Сент. — Т. 59. — DOI: 10.1016/j.asr.2016.08.028]. Также показаны данные расчетов, включая расчет из статьи Томассетти [*Tomassetti N.*, *Feng J.* The Curious Case of High-energy Deuterons in Galactic Cosmic Rays // The Astrophysical Journal Letters. — 2017. — Янв. — Т. 835, №2. — L26 15]. Однако возможно, что в число дейтронов включались и тритоны, поскольку формы каскадных кривых от дейтронов и тритонов отличаются слабо. На тот момент при обработке возможность регистрации тритонов вообще не рассматривалась. Судя по оценке доли тритонов, при вычитании тритонов из общего потока точка для 1 ТэВ/н должна заметно сдвинуться вниз и приблизиться к оценкам Томассетти.

Спектры дейтронов



Выводы

Существует реальная возможность экспериментального обнаружения потоков тритонов высоких энергий.
Для нестабильных тритонов пробег в Галактике существенно зависит от характера распространения.
Такие измерения позволят радикально улучшить модели происхождения и распространения космических лучей.
Необходимы новые эксперименты – ОЛВЭ или аналогичные.