

*Л. Н. Богданова, К. И. Грицай, Д. Л. Демин,
В. Н. Дугинов, А. Д. Конин, Т. Н. Мамедов,
А. И. Руденко, М. П. Файфман, А. А. Юхимчук*

В ОИЯИ открыты новые каналы реакции ядерного синтеза

Высокая вероятность синтеза ядер изотопов водорода в мюонных молекулах была теоретически предсказана Ф. Ч. Франком и А. Д. Сахаровым в конце 1940-х гг. и позднее экспериментально подтверждена в эксперименте Л. Альвареса (1957 г.). Первые строгие научные представления о сложной цепочке реакций, вызываемых мюоном в среде изотопов водорода H/D/T (явление мюонного катализа), сложились в работах Д. Джексона, Я. Б. Зельдовича и С. С. Герштейна к началу 1960-х гг.

С 1964 г. в ЛЯП ОИЯИ по инициативе В. П. Дзелепова начались систематические экспериментальные исследования мюонного катализа, результаты которых по праву относятся к фундаментальным достижениям физики: было открыто явление резонансного образования мезомолекул дейтерия; впер-

*L. N. Bogdanova, K. I. Gritsai, D. L. Demin,
V. N. Duginov, A. D. Konin, T. N. Mamedov,
A. I. Rudenko, M. P. Faifman, A. A. Yukhimchuk*

New Channels of the Nuclear Fusion Reaction Discovered at JINR

High fusion probability for nuclei of hydrogen isotopes in muonic molecules was theoretically predicted by F. Ch. Frank and A. D. Sakharov at the end of the 1940s and later experimentally confirmed by L. Alvarez (1957). The first strict scientific concepts regarding a complex chain of reactions induced by a muon in a mixture of hydrogen isotopes H/D/T (muon catalysis) were formulated in the papers of J. Jackson, Ya. B. Zel'dovich, and S. S. Gershtein in the early 1960s.

In 1964, V. P. Dzhelepov initiated systematic experimental research of muon catalysis at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR, which resulted in what could be rightfully regarded as fundamental achievements in physics: resonant formation of muonic deuterium molecules was discovered, a high rate of the muon catalysis cycle in a mixture of deuterium and tritium (D/T) predicted by

вые экспериментально подтверждена предсказанная в ОИЯИ Л. И. Пономаревым и теоретиками его группы высокая скорость цикла мю-катализа в D/T смеси дейтерия и трития; впервые получены спиновая и температурная зависимости скоростей образования мезомолекул в жидком и твердом дейтерии.

Эти результаты стимулировали исследования по мюонному катализу на протяжении десятилетий как в отечественных научно-исследовательских центрах (ОИЯИ, ПИЯФ), так и за рубежом (Великобритания, Канада, США, Швейцария, Япония).

Для дальнейшего изучения мю-катализа при плодотворном сотрудничестве ученых ЛЯП ОИЯИ с экспериментаторами из ВНИИЭФ (Саров), начатом В. Г. Зиновым, была создана специальная установка ТРИТОН (удостоенная первой премии ОИЯИ за 2002 г.). На этом оборудовании проведены систематические исследования явления мю-катализа, в результате которых были получены параметры цикла мю-катализа в смеси D/T в широком диапазоне экспериментальных условий (температура 20–800 К, давление до 1500 атм), а накопленный экспериментальный материал является рекордным по объему и по точности в сводке мировых данных. Также впервые были проведены исследования явления мюонного катализа

в плотной тройной H/D/T смеси изотопов водорода, наблюдались предсказанные для такой смеси эпitherмальные эффекты и сделан вывод о возможности разбавления D/T смеси водородом на уровне порядка 10% в целях экономии трития, что важно при разработке источников ядерной энергии с использованием мю-катализа. С рекордной точностью были измерены параметры цикла в среде чистого трития, изучен механизм реакции синтеза ядер трития, и сделан вывод о существенной $\alpha - n$ корреляции в конечном состоянии такой реакции. Также впервые была получена экспериментальная оценка выхода канала радиационного захвата дейтрона $dd \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$ по отношению к основным каналам dd -реакции, протекающей в мюонной молекуле $dd\mu$.

Мюонный катализ является эффективным методом изучения реакций синтеза изотопов водорода, особенно при низких, «астрофизических», энергиях столкновений ядер. С его помощью удалось впервые получить (либо уточнить) константы различных реакций при определенных спиновых состояниях ядер, а также обнаружить каналы синтеза, запрещенные при столкновении свободных ядер.

К настоящему времени все возможные ядерные реакции, катализируемые мюоном в смесях изотопов

L. I. Ponomarev and colleagues at JINR was experimentally confirmed for the first time, and spin and temperature dependences of muonic molecule formation rates in liquid and solid deuterium were obtained for the first time.

For decades, these results stimulated muon catalysis researches both in our country (JINR, PINP) and abroad (United Kingdom, Canada, United States, Switzerland, Japan).

The muon catalysis research at DNLП continued in fruitful cooperation with experimenters from VNIIEF (Sarov) initiated by V. G. Zinov. Systematic studies on the specially developed TRITON facility (2002 First JINR Prize) resulted in obtaining parameters of the muon catalysis cycle in a D/T mixture under a variety of experimental conditions (temperature 20–800 K, pressure up to 1500 atm) and acquiring experimental data of record high amount and accuracy. Muon catalysis in a dense triple H/D/T mixture of hydrogen isotopes was investigated for the first time, epithermal effects predicted for this mixture were observed, and a conclusion was drawn about a possibility of diluting the D/T mixture by hydrogen to a level of about 10% to save tritium, which is important for developing nuclear energy sources based on muon catalysis.

Parameters of the cycle in pure tritium were measured with a record accuracy, the mechanism for fusion of tritium nuclei was studied, and considerable $\alpha - n$ correlations in the final state of that reaction were inferred. Also, the yield of the radiative deuteron capture channel $dd \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$ with respect to the main channels of the dd reaction in the muonic molecule $dd\mu$ was experimentally estimated for the first time.

Muon catalysis is profitable for studying fusion reactions of hydrogen isotopes, especially at low, “astrophysical”, nuclear collision energies. It helped obtain or refine constants of various reactions at particular spin states of nuclei and find fusion channels forbidden in collisions of free nuclei.

By now, all kinds of muon-catalyzed nuclear reactions in mixtures of hydrogen isotopes have been well studied. An exception is fusion of proton and tritium nuclei. The latest experiment on the study of muon catalysis in the H/T mixture was carried out by an international team of experimenters at PSI (Switzerland) in 1993 [1]. Two exit channels of this reaction were observed: M1 transitions with emission of a gamma ray and, for the first time, E0 with conversion on the muon. The mea-

водорода, изучены достаточно хорошо, кроме реакций синтеза ядер протона и трития. Последний эксперимент по изучению мю-катализа в H/T смеси был проведен международной группой экспериментаторов в PSI (Швейцария, 1993 г.) [1]. В результате измерений наблюдались два выходных канала этой реакции: M1-переходы с испусканием гамма-кванта и впервые

E0 — с конверсией на мюоне. Измеренные выходы этих каналов pt -реакции существенно превышают ожидаемые значения, основанные на экспериментальных данных по радиационному захвату pt «на лету» и реакции $n + {}^3\text{He}$, зеркальной по отношению к радиационному каналу реакции $p + t$, так же как и вычисленные на основе данных по $n + {}^3\text{He}(e, e')pt$ реакции

Рис. 1. *a*) Схема экспериментальной установки: 1–3 — счетчики пучка мюонов; E1, E2 — электронный телескоп; F — фильтр пучка мюонов; G1, G2 — детекторы гамма-квантов; M — детектор мюонов; H/T — мишень с жидкой смесью изотопов водорода. *b*) Экспериментальный энергетический спектр электронов/позитронов реакции (3), зафиксированных детектором E1, необозначенный пик соответствует прохождению только одного партнера — электрона или позитрона из пары. *c*) Экспериментальный энергетический спектр мюонов конверсии в реакции (2), зафиксированных детекторами E1 и M

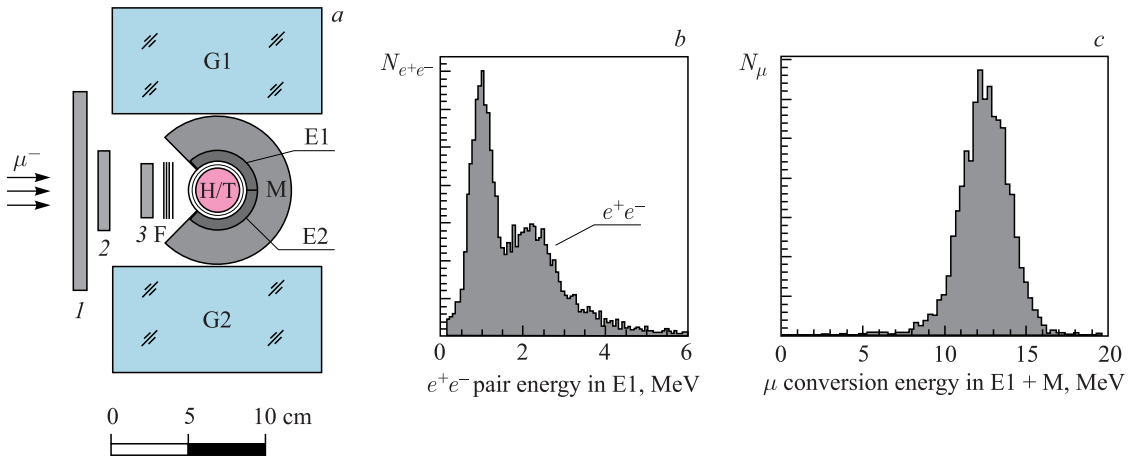


Fig. 1. *a*) Schematic view of the experimental facility: 1–3 are the muon beam counters, E1 and E2 are the electron telescope, F is the muon beam filter, G1 and G2 are the gamma detectors, M is the muon detector, and H/T is the target with the liquid mixture of hydrogen isotopes. *b*) Experimental energy spectrum of electrons/positrons from reaction (3) detected by the detector E1; the unlabeled peak corresponds to the passage of only one pair partner, an electron or a positron. *c*) Experimental energy spectrum of conversion muons in reaction (2) detected by the detectors E1 and M

sured yields of these pt reaction channels are appreciably larger than the expected values based on the experimental data on the in-flight radiative capture pt and the reaction $n + {}^3\text{He}$, which is a mirror reaction relative to the radiative channel of the $p + t$ reaction, and also the values calculated from the data on the $n + {}^3\text{He}(e, e')pt$ reaction (for the conversion channel). No explanation for this disagreement has been found so far. In addition, the conversion channel with the formation of e^+e^- pairs was not observed though its yield was predicted to be about the muon yield [2].

The so far unsolved problems in the description of the muon-involving pt fusion aroused interest of the DNLP scientific experimental group headed by D.L. Demin, and they proposed investigation of the pt fusion channels

$$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + \gamma + 19.82 \text{ MeV} (E_\gamma = 19.77 \text{ MeV}), \quad (1)$$

$$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + \mu + 19.81 \text{ MeV} (E_\mu = 19.22 \text{ MeV}), \quad (2)$$

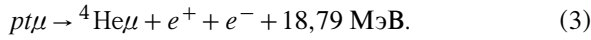
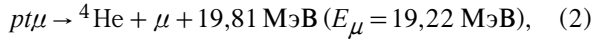
$$pt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + e^+ + e^- + 18.79 \text{ MeV}. \quad (3)$$

The TRITON project was prepared and soon supported by the JINR Programme Advisory Committee for Nuclear Physics (2011).

The team established for conducting the experiment had an appreciable background to allow successful implementation of the project. By that time, Demin's group had accomplished the experiment at DLNP on the search for the rare radiative deuteron capture reaction using specially designed gamma detectors with a measurement range up to 30 MeV. With this unique experience, the Dubna experimenters were prepared for studying characteristic features of the pt reaction. The experimental methodology was proposed by V.V. Fil'chenkov. The experimental target was designed according to the JINR specification. Electron-positron pair and muon detectors were developed to suit the compact experimental geometry (Fig. 1, *a*). The problem of parameterization of angular correlation of pair emission in the $p + t$ reaction was solved and performed with the Monte Carlo simulation of physical processes in the facility. Electronic equipment and software

(для конверсионного канала). Объяснение этому факту не найдено до сих пор. Кроме того, не наблюдался канал конверсии с образованием пар e^+e^- , хотя его выход предсказан на уровне выхода мюонов [2].

Оставшиеся нерешенными проблемы описания pt -синтеза с участием мюона заинтересовали научно-экспериментальную группу ЛЯП под руководством Д. Л. Демина, которая выступила с предложением исследовать следующие каналы реакции pt -синтеза:



Был подготовлен проект ТРИТОН, вскоре поддержанный Программно-консультативным комитетом по ядерной физике ОИЯИ (2011 г.).

Коллектив, созданный для проведения эксперимента, имел существенный задел для успешной реализации проекта. К тому времени группа завершила в ЛЯП эксперимент по обнаружению редкой реакции радиационного захвата дейтрона с использованием созданных детекторов гамма-излучения с диапазоном измерений до 30 МэВ. Основываясь на уникальном опыте работе с ними, дубненские экспериментаторы были готовы к изучению характерных особенностей

pt -реакции. Методологию эксперимента предложил В. В. Фильченков. Мишень для эксперимента разработали во ВНИИЭФ по техническому заданию ОИЯИ. Были разработаны необходимые детекторы электрон-позитронных пар и мюонов для требуемой компактной геометрии эксперимента (рис. 1, а), электроника и программное обеспечение, аналитически решена задача параметризации угловой корреляции вылета пар в реакции $p+t$, проведено моделирование физических процессов в установке по методу Монте-Карло. Большая работа была выполнена по наладке инфраструктуры фазотрона, в том числе восстановлена «растяжка» протонного пучка. Для анализа экспериментальных данных у группы есть тесный контакт как с российскими теоретиками, работающими в области

Рис. 2. Экспериментальный суммарный спектр энергии парных гамма-квантов в реакции (4), сложенный из совпавших по времени событий в гамма-детекторах G1 и G2

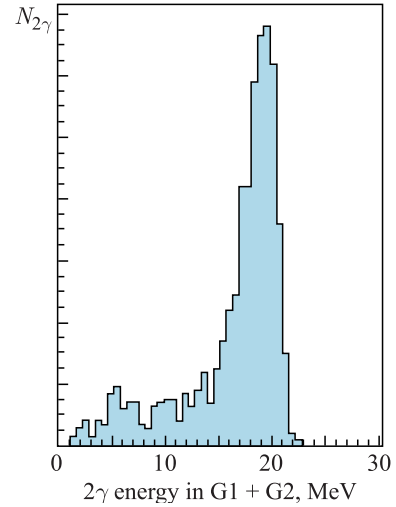


Fig. 2. Experimental summed energy spectrum of gamma-ray pairs in reaction (4): events in the gamma detectors G1 and G2 coinciding in time are added up to the summed energy spectrum

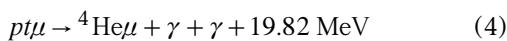
were developed. Much was done for proper arrangement of the Phasotron infrastructure, including restoration of the proton beam “stretcher”. To analyze experimental data, the group has close contacts with both Russian muon-physics theorists and foreign colleagues from Polish and Czech research centres. A detailed description of the experiment at its preparatory stage is given in [3].

In May 2016 an experiment on the search for muon catalysis in an H/T mixture was carried out on the DNLP Phasotron, JINR, in collaboration with VNIIEF specialists.

Earlier known pt fusion channels (1), (2) with the yield of single gamma rays and conversion muons were observed in the experiment (Fig. 1, c). Now the analysis of the experimental results is under way, but the following important conclusions can already be drawn:

1. The pt fusion channel with the yield of electron-positron pairs (Fig. 1, b) has been observed for the first time.

2. Evidence for existence of a new channel with the yield of a gamma-ray pair



has been obtained for the first time (Fig. 2).

3. The experimental results confirm Zel’dovich and Gershtein’s theoretical predictions (1960) about product yields in muon-involving nuclear reaction in cold hydrogen.

The authors of the experiment and the DNLP Directorate express their gratitude to the personnel of the Scientific Self-Sustained Division of the Phasotron Department, Radiation Safety Department, Radioactive and Fissionable Materials Department, and Electrotechnological Department at DNLP and to the JINR Security Department for the help and support in preparation and conduction of the experiment. The development of the TRITON facility was supported by the International Science and Technology Centre; the development of detectors and conduction of experiment, by the Russian Foundation for Basic Research.

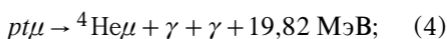
мюонной физики, так и с зарубежными коллегами из научно-исследовательских центров Польши и Чехии. Детальное описание эксперимента на стадии подготовки содержится в работе [3].

В мае 2016 г. поисковый эксперимент по мюонному катализу в смеси Н/Т был проведен в Дубне на фазотроне ЛЯП ОИЯИ в сотрудничестве со специалистами ВНИИЭФ.

В эксперименте наблюдались известные ранее каналы реакции pt -синтеза (1), (2) с выходом одиночных гамма-квантов и мюонов конверсии (рис. 1, *c*). В настоящее время проводится обработка результатов эксперимента, но уже сейчас из предварительного анализа данных следуют важные выводы:

1) впервые при исследовании реакций pt -синтеза обнаружен канал с выходом электрон-позитронных пар (рис. 1, *b*);

2) впервые получено указание на существование нового канала с выходом пары гамма-квантов (рис. 2):



3) полученные результаты подтверждают теоретические предсказания Я. Б. Зельдовича и С. С. Герштейна (1960 г.) о продуктах выхода в ядерных реакциях в холодном водороде с участием мюонов.

Авторы эксперимента и дирекция ЛЯП выражают благодарность коллективам НХП ОФ, ОРБ, ОРДВ, СБ ОИЯИ и ЭТО ЛЯП за помощь и поддержку при подготовке и проведении эксперимента. Создание установки ТРИТОН поддержано грантом МНТЦ, а работа детекторов и проведение самого эксперимента — РФФИ.

Список литературы / References

1. *Baumann P. et al.* Muon-Catalyzed pt -Fusion // *Phys. Rev. Lett.* 1993. V. 70. P. 3720.
2. *Oppenheimer J. R., Schwinger J. S.* // *Phys. Rev.* 1939. V. 56. P. 1066.
3. *Bogdanova L. N. et al.* Experimental Study of Nuclear Fusion Reactions in a $pt\mu$ System // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2012. V. 9, No. 8. P. 605–614.