

**Review report on  
"The BECQUEREL-2022 experiment at  
the NUCLOTRON/NICA accelerator complex"**

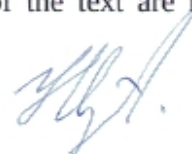
The BECQUEREL experiment is dedicated to the use of relativistic nucleus beams to study nuclear clustering phenomena. The alpha clustering of many nuclei affects nuclear level spectra, nuclear reaction dynamics and characteristics, and in recent years has been actively studied theoretically in microscopic *ab initio* approaches based on first principles (D. Lee, Front. Phys. 2020; doi: 10.3389/fphy. 2020.00174). Information about nuclear clustering is important both for understanding many phenomena in nuclear astrophysics and for practical applications in nuclear medicine and other areas related to the use of nuclear technologies.

Traditional methods of experimental study of the cluster structure of nuclei – cluster transfer reactions, photo-disintegration of nuclei, knocking out of clusters by protons, electrons, and other probes despite their detailed development and wide application, do not cover all possible aspects of multiple cluster phenomena. The method of studying the fragmentation of relativistic nuclei in nuclear emulsions used in the BECQUEREL experiment in combination with the use of a computerized microscope has important advantages and can make a significant contribution to these studies. At the previous stages of this experiment, the contribution of the unstable  $^8\text{Be}$  and  $^9\text{B}$  nuclei and the Hoyle state of the  $^{12}\text{C}$  nucleus to the processes of dissociation of a number of light nuclei, including radioactive ones, was identified by the invariant mass method. The approach was later extended to the fragmentation of medium and heavy nuclei.

The current stage of the project is focused on studying the predictions of the well-known in the literature concept of the alpha-particle Bose-Einstein condensate (H. Tohsaki et al. Rev. Mod. Phys. 89 (2017) 01100), the simplest manifestations of which are assumed to be the  $^8\text{Be}$  nucleus and the Hoyle state. The experiment is aimed at studying the increase in the yield of  $^8\text{Be}$  nuclei and the Hoyle state found in the fragmentation of heavy nuclei, as well as at searching for a 4-alpha analogue of the Hoyle state. To solve this problem, there are necessary prerequisites - nuclear emulsions exposed to krypton nuclei and a high-performance microscope.

Within the framework of the project, it is planned to expose nuclear emulsions with heavier nuclei and to study in detail the isotopic composition of fragmentation of heavy nuclei. The study of the fragmentation of light nuclei will also be continued in order to search for highly excited nuclear-molecular formations in decays of isobar-analogue states. It is planned to expose to relativistic muons. The results expected in this case can be applied in nuclear geology and radiobiology.

In general, the study of the phenomenon of the formation of multiple states in the dissociation of relativistic nuclei in nuclear emulsions is currently an alternative to traditional research by methods of low-energy cluster physics. The scientific significance of the project is high. The first results of the project are published in peer-reviewed publications. The requested resources correspond to the objectives of the project. The attention of the authors is drawn to the progress in the microscopic description of Hoyle's condition and the importance of close collaboration with theorists. The stylistic shortcomings of the text are noted. In general, the project deserves support.



Yu.N. Uzikov,  
Leading Researcher, DSc

**Отзыв на проект  
«Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ-2022 на ускорительном комплексе  
НУКЛОТРОН/NICA»**

Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ посвящен использованию релятивистских пучков атомных ядер для изучения явления кластеризации в ядрах. Альфа-кластеризация многих ядер влияет на спектры ядерных уровней, динамику и характеристики ядерных реакций и в последние годы активно исследуется теоретически в микроскопических *ab initio* подходах, основанных на первых принципах (D. Lee, *Front. Phys.* 2020; doi: 10.3389/fphy.2020.00174). Информация о кластеризации ядер важна как для понимания многих явлений в ядерной астрофизике, так и для практического применения в ядерной медицине и других областях, связанных с использованием ядерных технологий.

Традиционные методы экспериментального исследования кластерной структуры ядер — реакции передачи кластеров, фото-расщепление ядер, выбивание кластеров протонами, электронами и другими пробниками, — несмотря на их детальную разработку и широкое применение, не охватывают все возможные аспекты мультикластерных явлений. Метод изучения фрагментации релятивистских ядер в ядерных эмульсиях, используемый в эксперименте БЕККЕРЕЛЬ в сочетании с применением компьютеризированного микроскопа, обладает важными достоинствами и может внести значимый вклад в эти исследования. На предшествующих этапах этого эксперимента методом инвариантной массы идентифицирован вклад нестабильных ядер  ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^9\text{B}$  и состояния Хойла ядра  ${}^{12}\text{C}$  в процессы диссоциации ряда легких ядер, в том числе радиоактивных. Позднее подход был распространен на фрагментацию средних и тяжелых ядер.

Современный этап проекта ориентирован на изучение предсказаний известной в литературе (H. Tohsaki et al. *Rev. Mod. Phys.* 89 (2017) 01100) концепции альфа-частичного конденсата Бозе-Эйнштейна, простейшими проявлениями которого предполагаются ядро  ${}^8\text{Be}$  и состояние Хойла. Эксперимент нацелен на исследование обнаруженного во фрагментации тяжелых ядер усиления выхода ядер  ${}^8\text{Be}$  и состояния Хойла, а также на поиск 4-альфа аналога состояния Хойла. Для решения этой задачи имеются необходимые предпосылки — ядерные эмульсии, облученные ядрами криптона, и высокопроизводительный микроскоп.

В рамках проекта планируется провести облучение ядерных эмульсий более тяжелыми ядрами и детально исследовать изотопический состав фрагментации тяжелых ядер. Исследование фрагментации легких ядер также будет продолжено с целью поиска высоковозбужденных ядерно-молекулярных образований в распадах изобар-аналоговых состояний. Планируется выполнить облучение ядер релятивистскими мюонами. Ожидаемые при этом результаты могут иметь применение в ядерной геологии и радиобиологии.

В целом, исследование явления образования множественных состояний в диссоциации релятивистских ядер в ядерных эмульсиях в настоящее время является альтернативой традиционным исследованиям методами кластерной физики низких энергий. Научная значимость проекта высока. Первые результаты проекта опубликованы в рецензируемых изданиях. Запрашиваемые ресурсы соответствуют задачам проекта. Внимание авторов обращено на прогресс в микроскопическом описании состояния Хойла и важность тесного сотрудничества с теоретиками. Отмечены стилистические недостатки текста. В целом, проект заслуживает поддержки.

  
Ю.Н. Узиков,  
ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.