

## Рецензия на проект

"Эксперимент БЕККЕРЕЛЬ на ускорительном комплексе НУКЛОТРОН/НИКА"


Проект направлен на прояснение взаимодействия лёгких ядер при низких энергиях и возможного проявления конденсата Бозе-Эйнштейна из  $\alpha$ -частиц при релятивистской фрагментации тяжёлых ядер. Особое внимание уделяется прояснению роли ядерных кластеров ( $\alpha$ -частичных) в таких реакциях. Ядро, как многочастичная система, имеет широкий спектр возбуждений, включающий не только одночастичные возбуждения (нуклонные), но и коллективные. Для понимания протекания ядерных реакций существенную роль играют особенности в непрерывном спектре, включая ядерные резонансы и ядерные кластеры. Представления о структуре и свойствах таких состояний (энергии, ширины для ядерных резонансов) и вероятности их образования (иногда как промежуточного состояния) важно для понимания синтеза ядер во Вселенной.

Остановимся на соответствии метода исследования решаемым задачам. В проекте исследуются продукты фрагментации релятивистских ядер в области спектаторов, другими словами в области малых углов, где продукты диссоциации имеют импульс на нуклон близкий к импульсу на нуклон в налетающем ядре. В качестве базового детектора используется метод ядерной фотоэмульсии. В области фрагментации налетающего ядра характерные углы  $\theta$  определяются отношением импульса Ферми для нуклона ( $p_F \sim 0.2$  ГэВ) к импульсу на нуклон в налетающем ядре ( $p_b \sim 4.5$  на нуклон). Это даёт для протонов спектаторов углы разлёта  $\theta_p \leq 0.04$  рад. Согласно работе *A. S. Goldhaber, Phys. Lett. B 53, 306 (1974)* для ядерных фрагментов угловые распределения уже, чем для протонов. Так для  $\alpha$  частиц, рождённых при фрагментации углерода  $\theta_\alpha \leq 0.01$  рад. Не вдаваясь в детали следует отметить, что предположение сохранения импульса на нуклон, используемое при вычислении эффективной массы, выполняется для  $\alpha$  частиц точнее, чем для протонов. Это также одно из следствий цитируемой выше работы.

Ещё одной особенностью исследований с ядерной фотоэмульсией является возможность наблюдения следов нескольких ядер в конусе фрагментации. Т.е. открываются возможности для корреляционных исследований. В таких условиях относительные углы уже между фрагментами на порядок меньше указанных выше. Трудно представить электронный эксперимент, с таким высоким как в эмульсии пространственным разрешением и, что связано, с угловым разрешением. Поиск возможных проявлений  $\alpha$  конденсата делает такие исследования интересными и полезными. Трудно надеяться, что в проекте будут получены исчерпывающие ответы о свойствах такого конденсата, но такого рода исследования не только интересны как поисковый эксперимент, но и необходимы для более глубокого понимания свойств адронной материи.

Считаю, что проект должен быть поддержан. В пользу этого говорят не только приведённые выше аргументы, но и большое число опубликованных статей по результатам предыдущих исследований в реферируемых журналах. Только за предыдущие 5 лет было опубликовано 19 работ. С 2008 года и до настоящего времени по тематике проекта было защищено 6 кандидатских и одна докторская диссертация. Проект важен для освоения начинающими исследователями представлений и методов релятивистской ядерной физики.

Значимость исследования отвечает запрашиваемым ресурсам. Имеется исследовательский материал на предлагаемый период, и перспектива получения нового на более пучках тяжёлых ядер при более высокой энергии. Недавно получен моторизованный микроскоп, позволяющий рассчитывать на резкое увеличение и полноту анализа. Информация об этом эксперименте полно представляется на сайте.

  
110.02.2022/

А.Г. Литвиненко  
начальник сектора ЛФВЭ ОИЯИ, д.ф.м.н.

**Project review**  
**“The BECQUEREL experiment at the NUCLOTRON/NICA accelerator complex”**


The project is aimed at studying interactions of light nuclei at low energies and possible manifestation of the  $\alpha$ -particle Bose-Einstein condensate in relativistic fragmentation of heavy nuclei. Particular attention is to the clarifying a role of nuclear clusters ( $\alpha$ -particles) in these reactions. The nucleus, as a many-particle system, has a wide range of excitations, including not only single-particle excitations (nucleon), but also the collective ones. To understand the course of nuclear reactions, singularities in the continuous spectrum, including nuclear resonances and nuclear clusters, play an essential role. Ideas about the structure and properties of these states (energy, width for nuclear resonances) and a probability of their formation (sometimes as an intermediate state) are important for understanding the synthesis of nuclei in the Universe.

Let us dwell on correspondence of the research method to the tasks being solved. The project studies fragmentation products of relativistic nuclei in the region of spectators, in other words, in the small angle region, where dissociation products have a momentum per nucleon close to a momentum per nucleon in a projectile nucleus. The nuclear emulsion method is used as a basic detector. In the fragmentation region of a projectile nucleus, the characteristic angles  $\theta$  are determined by the ratio of the Fermi momentum for a nucleon ( $p_F \sim 0.2$  GeV) to the momentum per nucleon in the projectile nucleus ( $p_b \sim 4.5$  per nucleon). This gives the spectator protons expansion angles  $\theta_p \leq 0.04$  rad. According to A. S. Goldhaber, Phys. Lett. B 53, 306 (1974) for nuclear fragments, the angular distributions are narrower than for protons. So for the  $\alpha$ -particles produced during carbon fragmentation  $\theta_\alpha \leq 0.01$  rad. Without going into details, it should be noted that the assumption of conserving the momentum per nucleon used in calculating the effective mass is more accurate for  $\alpha$ -particles than for protons. This is also one of the consequences of the work cited above.

Another feature of studies with nuclear emulsion is an opportunity of observing tracks of several nuclei in the fragmentation cone. It opens opportunities for correlation studies. Under such conditions, the relative angles between the fragments are an order of magnitude smaller than those indicated above. It is difficult to imagine an electronic experiment with such a high spatial resolution as in the emulsion and, what is related, with an angular resolution. The search for possible manifestations of  $\alpha$  condensate makes such studies interesting and useful. It is hard to hope that the project will provide comprehensive answers about the properties of this condensate, but these studies are not only interesting as a exploratory experiment, but also necessary for a deeper understanding of the properties of hadronic matter.

I think that the project should be supported. This is justified not only by the above arguments, but also by a large number of publications based on the results of previous studies in peer-refereed journals. Only in the previous 5 years, 19 papers were published. Since 2008 till the present moment, 6 candidate and doctoral dissertations have been defended on the project subject. The project is important for young researchers to master the concepts and methods of relativistic nuclear physics.

The significance of the study is in line with the resources requested. There is research material for the proposed period, and the prospect of obtaining new material on more beams of heavy nuclei at higher energies. Recently, a motorized microscope has been obtained, which makes it possible to count on a sharp increase and completeness of the analysis. Information about this experiment is fully presented on the site.

  
1/10.02.2022/

A.G. Litvinenko  
Head of Sector VBLHEP JINR, Ph.D.