

*В. П. Ладыгин*

## Изучение плотной барионной материи на HADES

HADES является многоцелевым детектором для точной спектроскопии  $e^+e^-$ -пар (дизлектронов) и заряженных адронов, образующихся в реакциях, индуцированных протонами, пионами и тяжелыми ионами в области кинетической энергии пучка 1–3,5 ГэВ на ускорительном комплексе SIS18 в GSI (Дармштадт, Германия). Основная экспериментальная цель — исследовать свойства плотного ядерного вещества, созданного в ходе столкновений тяжелых ионов, и в конечном итоге узнать о свойствах адронов в среде (например, массах, ширинах распада). Дизлектронные пары, рожденные из адронных распадов в среде, и редкие странные адроны (каоны, гипероны) являются основными пробниками, измеряемыми в эксперименте. Поскольку выводы об эффектах в среде сильно зависят от понимания свойств адронов в вакууме и механизма их рождения в нуклон-нуклонных столкновениях, выполняется дополнительная программа, ориентирован-

ная на рождение  $e^+e^-$ -пар, каонов и гиперонов ( $\Sigma$ ,  $\Lambda$ ) в элементарных столкновениях.

Основным научным направлением программы HADES являются систематические исследования рождения векторных мезонов и дилептонного континуума в  $e^+e^-$ -режиме. Выход дизлектронов, полученный для реакции Au + Au при 1,23 АГэВ [1] на HADES, показан на рисунке. Сплошными линиями обозначены расчеты коктейля для различных моделей без вклада  $\eta$ - и  $\omega$ -мезонов, пунктирной линией — вклад  $\rho$ -мезонного распада. Данные описываются удовлетворительно с учетом модификации  $\rho$ -мезона в среде. Спектральное распределение дилептонных пар почти экспоненциально, что свидетельствует об источнике температуры свыше 70 МэВ с компонентами, свойства которых были изменены, что отражает особенности сильного взаимодействия КХД-материи. Его глобальные свойства сходны с плотной материей, образу-

*V. P. Ladygin*

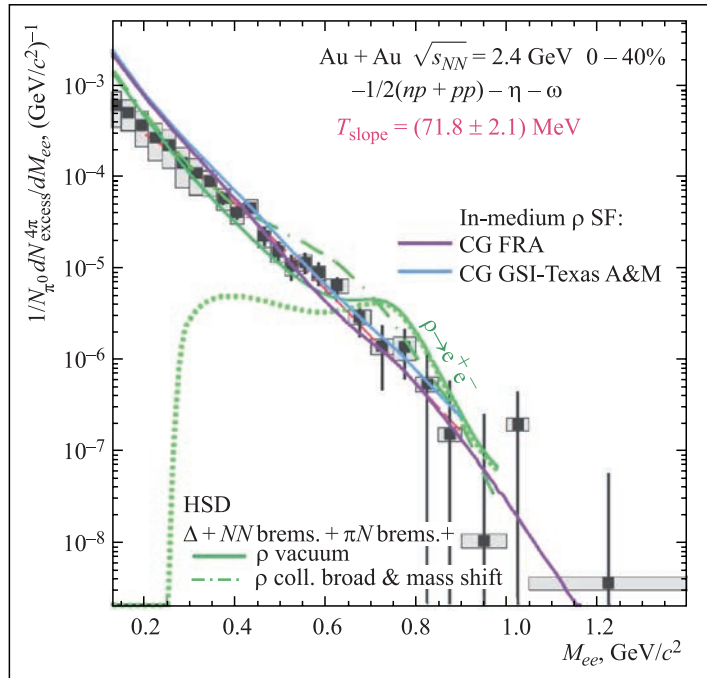
## Study of Dense Baryonic Matter at HADES

HADES is a versatile detector for a precise spectroscopy of  $e^+e^-$  pairs (dielectrons) and charged hadrons produced in proton-, pion- and heavy-ion-induced reactions in a 1–3.5 GeV kinetic beam energy range at the accelerator complex SIS18 at GSI, Darmstadt. The main experimental goal is to investigate the properties of dense nuclear matter created in the course of heavy-ion collisions and to ultimately learn about in-medium hadron properties (like masses, decay widths). Dielectron pairs originating from in-medium hadron decays and rare strange hadrons (kaons, hyperons) are the main probes measured in the experiment. Since the conclusions on in-medium effects rely strongly on the understanding of hadron properties in vacuum and their production mechanism in nucleon–nucleon collisions, a complementary program focusing on  $e^+e^-$ , kaon and hyperon ( $\Sigma$ ,  $\Lambda$ ) production in elementary collisions is also in progress.

The main scientific direction of the HADES program is the systematic studies of vector meson production and dilepton continuum in the  $e^+e^-$ -mode. The dielectron yield obtained for Au + Au reaction at 1.23 AGeV [1] at HADES is shown in the figure. The solid lines are the cocktail calculations for different models without  $\eta$ - and  $\omega$ -meson contribution. The dashed line is the contribution of the  $\rho$ -meson decay. The data are adequately described taking into account the in-medium modification of  $\rho$  meson. The spectral distribution of the electron–positron pairs is nearly exponential, providing evidence for a source of temperature above 70 MeV with constituents whose properties have been modified, thus reflecting peculiarities of strong interaction of QCD matter. Its bulk properties are similar to those of the dense matter formed in the final state of a neutron star merger, as apparent from recent astrophysical observations.

Выход диэлектронов для реакции Au + Au при 1,23 АГэВ на HADES [1]. Сплошные линии — расчет коктейля для различных моделей без вклада  $\eta$ - и  $\omega$ -мезонов. Пунктирная линия — вклад от распада  $\rho$ -мезона

The dielectron yield for Au + Au reaction at 1.23A GeV obtained at HADES [1]. The solid lines are the cocktail calculations for different models without  $\eta$ - and  $\omega$ -meson contribution. The dashed line shows the contribution of the  $\rho$ -meson decay



Восстановление одного из секторов многопроволочной дрейфовой камеры HADES в детекторной лаборатории GSI

Refurbishment of one of the multiwire drift chamber sectors at the GSI Detector Lab

The description of yields and the regularity of freeze-out parameters were tested by comparing the freeze-out parameters obtained from a statistical model [2] to HADES data [3] obtained from  $p + \text{Nb}$ ,  $\text{Ar} + \text{KCl}$  and  $\text{Au} + \text{Au}$  collisions at the center-of-mass energies of  $\sqrt{s_{NN}} = 3.2, 2.6,$  and  $2.42$  GeV, respectively. A rather surprising finding has been made that the statistical model is able to describe  $p + \text{Nb}$  data as well as the larger systems like  $\text{Ar} + \text{KCl}$  or  $\text{Au} + \text{Au}$  that questions the often drawn connection between the agreement of statistical models with particle

yields in heavy-ion collisions (HIC) and thermalization. Furthermore, it was found that the excess of  $\Xi^-$  is already present in cold nuclear matter. Taking into account the rates of higher-lying  $N^*$  resonances predicted by the statistical model fit, a rather implausible explanation was found for the excess of  $\Xi^-$  yield over the model value. In addition, the importance of a precise knowledge of the hadron spectrum for interpretation of HIC data is stated. The HADES data of central  $\text{Au} + \text{Au}$  collisions are in rather good agreement with the statistical model.

щейся в конечном состоянии при слиянии нейтронных звезд, как это видно из недавних астрофизических наблюдений.

Описание выходов и стабильность freeze-out параметров были проверены путем сравнения полученных параметров из статистической модели [2] с данными HADES [3], полученными при столкновениях  $p + \text{Nb}$ ,  $\text{Ag} + \text{KCl}$  и  $\text{Au} + \text{Au}$  при энергиях в системе центра масс  $\sqrt{s_{NN}} = 3,2, 2,6$  и  $2,42$  ГэВ соответственно. Было сделано довольно удивительное открытие о том, что статистическая модель способна описывать данные по реакции  $p + \text{Nb}$ , а также для систем с большим количеством нуклонов, таких как  $\text{Ag} + \text{KCl}$  или  $\text{Au} + \text{Au}$ , что ставит под сомнение часто проводимую связь между согласованием статистических моделей с выходами частиц в столкновениях тяжелых ионов и термализацией. Кроме того, было установлено, что избыток  $\Xi^-$  присутствует уже в холодном ядерном веществе. С учетом выходов более высоких  $N^*$ -резонансов, предсказанных статистической моделью, было найдено довольно неправдоподобное объяснение превышения выхода  $\Xi^-$  над значением, которое дает модель. Помимо этого, указывается важность точного знания адронного спектра для интерпретации данных по столкновениям тяжелых ионов. Данные HADES в центральных  $\text{Au} + \text{Au}$

столкновениях находятся в достаточно хорошем согласии со статистической моделью.

Систематическое исследование корреляций [4, 5], флуктуаций [6], различных гармоник потоков частиц [7] в ядро-ядерных столкновениях делает HADES лидирующим экспериментом в области ГэВ-ных энергий.

Группа ОИЯИ в HADES выполняет техническое обслуживание многопроволочных дрейфовых камер, участвует в наборе и анализе данных, полученных в столкновениях  $NN$ ,  $\pi N$ ,  $pA$  и  $\text{AgAg}$ , и их теоретической интерпретации, ведет модернизацию детектора и программного обеспечения для продолжения работы HADES на FAIR.

Коллаборация HADES планирует продолжить набор статистики на пучках пионов, протонов, дейтронов и Au для изучения электромагнитных форм-факторов барионов, включая каскадные гипероны, изотопическую зависимость выхода дилептонов, свойства холодной плотной материи, уравнения состояния плотной ядерной материи при ее больших плотностях.

#### Список литературы / References

1. Adamczewski-Musch J. et al. (HADES Collab.). Probing Dense Baryon-Rich Matter with Virtual Photons // Nature Phys. 2019. V. 15. P. 1040–1045.
2. Andronic A., Braun-Munzinger P., Stachel J. Hadron Production in Central Nucleus–Nucleus Collisions at Chemical Freeze-Out // Nucl. Phys. A. 2006. V. 772. P. 167.
3. Agakishiev G. et al. (HADES Collab.). Statistical Hadronization Model Analysis of Hadron Yields in  $p + \text{Nb}$  and  $\text{Ar} + \text{KCl}$  at SIS18 Energies // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52. P. 178.
4. Adamczewski-Musch J. et al. (HADES Collab.). Identical Pion Intensity Interferometry in Central  $\text{Au} + \text{Au}$  Collisions at 1.23 AGeV // Phys. Lett. B. 2019. V. 795. P. 446–451.
5. Adamczewski-Musch J. et al. (HADES Collab.). Identical Pion Intensity Interferometry at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.4$  GeV // Eur. Phys. J. A. 2020. V. 56, No. 5. P. 140.
6. Adamczewski-Musch J. et al. (HADES Collab.). Proton Number Fluctuations in  $\sqrt{s_{NN}} = 2.4$  GeV  $\text{Au} + \text{Au}$  Collisions Studied with HADES // Phys. Rev. C. 2020. V. 102, No. 2. P. 024914.
7. Adamczewski-Musch J. et al. (HADES Collab.). Directed, Elliptic and Higher Order Flow Harmonics of Protons, Deuterons and Tritons in  $\text{Au} + \text{Au}$  Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.4$  GeV. arXiv:2005.12217 [nucl-ex].

Systematic study of correlations [4, 5], fluctuations [6], different harmonics of particle flows [7] in nucleus–nucleus collisions makes HADES the leading experiment in the GeV energy range.

At HADES the JINR group performs the maintenance of multiwire drift chambers, participates in data taking and analysis of the data obtained in  $NN$ ,  $\pi N$ ,  $pA$  and  $\text{AgAg}$  and their theoretical interpretation, and provides the upgrade of the detector and software for continuation of the HADES operation at FAIR.

The HADES collaboration plans to continue collecting the statistics with pion, proton, deuteron, and Au beams to study the electromagnetic form factors of baryons, including cascade hyperons, isotopic dependence of the dilepton yield, properties of cold dense matter and equations of state of dense nuclear matter at high densities.