

1. Экспериментальное подтверждение эффекта Мигдала

В 1939 г. выдающийся советский физик А.Б. Мигдал предсказал теоретически эффект передачи энергии от атомного ядра окружающим электронам [1]. При рассеянии нейтральной частицы ядро испытывает отдачу, электронные оболочки атома не успевают сразу перестроиться, и их деформация проявляется в виде электронного возбуждения или ионизации [2, 3]. Эффект Мигдала может быть крайне полезным для регистрации редких процессов, но наблюдать его в экспериментах по рассеянию ядер ранее не удавалось. D. Yi (Университет Китайской академии наук и Университет Гуанси, Китай) и соавторы впервые получили прямое экспериментальное подтверждение эффекта Мигдала в процессе столкновений нейтронов с ядрами [4]. Был разработан специальный низкофоновый газовый детектор, в котором с помощью пиксельного чипа наблюдались треки рассеянных ядер и электронов, исходящие из одной вершины (точки рассеяния). Из почти 10^6 изученных событий взаимодействия нейтронов с ядрами шесть событий соответствовали эффекту Мигдала, а статистическая достоверность регистрации эффекта составила 5σ . Измеренное сечение эффекта Мигдала в пределах погрешностей эксперимента согласуется с рассчитанным сечением. Таким образом, работа [4] устраняет давний пробел в экспериментальной проверке эффекта Мигдала и показывает принципиальную возможность регистрации с помощью этого эффекта лёгких частиц тёмной материи с массами $1 - 10^3$ МэВ [5]. 11 марта 2026 г. исполняется 115 лет со дня рождения А.Б. Мигдала. В статьях [6–8] представлены воспоминания о его жизни и научной работе.

2. Интерференция позитрония

Позитроний Ps — связанное состояние электрона и позитрона e^-e^+ — имеет время жизни до аннигиляции 142 нс и ведёт себя как нейтральный атом, аналогично атому водорода. Y. Nagata (Токийский университет науки, Япония) и соавторы впервые продемонстрировали квантовую интерференцию Ps как целого (а не как системы двух отдельных частиц) в свободном про-

странстве [9]. Чистый пучок Ps получался в результате фоторасщепления ионов Ps^+ , возникающих при пролёте пучка e^+ от радиоактивного источника через вольфрам. Дифракция Ps происходила на графене — слое углерода атомарной толщины. Первый интерференционный пик точно соответствовал периоду кристаллической решётки графена и энергии Ps как целого, а пиков, соответствующих энергии отдельных e^- или e^+ , не наблюдалось. Это свидетельствует о том, что имела место интерференция Ps как единого объекта, а не его составных частей. Ps, являясь нейтральной частицей, гораздо слабее взаимодействует с электромагнитными полями, например с поверхностными зарядами, по сравнению с e^- или e^+ , поэтому в дифракционных исследованиях кристаллических веществ с помощью Ps можно будет исключить часть помех. О технике работы с позитронами см. [10].

3. Клонирование зашифрованных кубитов

Свойство унитарности в квантовой механике приводит к "теореме о запрете клонирования", согласно которой нельзя создать точную копию неизвестного квантового состояния. Данная теорема накладывает существенное ограничение на возможность неразрушающего копирования квантовой информации, в том числе она важна для квантовой криптографии. K. Yamaguchi (Университет Ватерлоо, Канада и Университет электросвязи, Япония) и A. Kemrf (Университет Ватерлоо и Институт теоретической физики Perimeter, Канада) в своём теоретическом исследовании показали, что квантовое состояние всё же может быть скопировано, но только в том случае, когда такое состояние зашифровано [11]. С помощью специального унитарного преобразования можно создать множество зашифрованных клонов кубита, но последующая дешифровка возможна лишь для одного клона. Дешифровка любого кубита уничтожает ключ шифрования, не позволяя дешифровать другие кубиты, как того и требует "теорема о запрете клонирования". Таким образом, сама эта теорема при копировании не нарушается. О квантовых технологиях и квантовой криптографии см. [12–16].

4. Дробные состояния Холла с чётным знаменателем

Квазичастицы с дробными зарядами [17, 18], как правило, подчиняются статистике энионов — промежуточной между бозонной и фермионной статистиками. Предполагается, что среди состояний с чётным зна-

менателем могут быть неабелевы состояния, когда при обмене двух частиц местами изменяется не только фаза их общей волновой функции, но и её форма. J. Kim (Институт им. Вейцмана, Израиль) и соавторы получили в своём эксперименте свидетельства возможного существования неабелевых энионов [19]. Изучалась двухслойная ван дер Ваальсова гетероструктура на основе бислоя графена, заключённого между слоями гексагонального нитрида бора. В этой структуре по различным траекториям распространялись квазичастицы — энионы, и наблюдалась их интерференция в зависимости от магнитного поля. В интерференционной картине была видна периодичность эффекта Ааронова–Бома с периодом в два кванта потока магнитного поля Φ_0 . Наиболее консервативной интерпретацией является интерференция абелевых квазичастиц с зарядом $e^* = (1/2)e$, однако возможен и вариант с неабелевыми квазичастицами, несущими заряды $e^* = (1/4)e$ и совершающими два обхода по контуру. Пока нельзя точно сказать, какой из двух вариантов наблюдался в эксперименте. Неабелевы состояния могут найти применение для передачи квантовой информации с топологической защитой.

5. Наблюдения гамма-телескопа DAMPE

Ранее телескопом Fermi-LAT на борту космической гамма-обсерватории им. Э. Ферми были обнаружены так называемые "пузыри Ферми" — гигантские образования по обе стороны от диска Галактики — и избыток гамма-излучения из центральной области Галактики. Происхождение пузырей Ферми, вероятно, объясняется струйными выбросами из центра Галактики во время активности центральной чёрной дыры, а избыток гамма-излучения из центра Галактики может быть связан с аннигиляцией тёмной материи или излучением миллисекундных пульсаров [5]. До последнего времени Fermi-LAT был единственным телескопом, который наблюдал указанные два феномена. Космический гамма-телескоп DAMPE (DARK Matter Particle Explorer), запущенный в 2015 г. и регистрирующий гамма-фотоны с энергией выше 2 ГэВ, представил первое независимое подтверждение существования пузырей Ферми и избытка гамма-излучения из центра Галактики [20]. Достоверность регистрации этих гамма-источников по данным, накопленным за 8,5 лет наблюдений, составила $\sim 26\sigma$ и $\sim 7\sigma$ соответственно, а их спектры и морфология полностью соответствуют предшествующим данным Fermi-LAT. Характер гамма-избытка от центра Галактики хорошо согласуется с моделью аннигиляции частиц тёмной материи с массами ~ 50 ГэВ и сечением аннигиляции $\langle\sigma v\rangle \sim 10^{-26}$ см³ с⁻¹ (по каналу b -кварков), близким к сечению рождения частиц тёмной материи в ранней Вселенной по тепловому механизму, но также допустим канал аннигиляции в τ -лептоны.

Список литературы

- Мигдал А Б "Ионизация атомов при ядерных реакциях" *ЖЭТФ* **9** 1163 (1939)
- Feinberg E L "Ionization of the atom due to β -decay" *J. Phys. Acad. Sci. USSR* **4** 423 (1941)
- Мигдал А "Ионизация атомов при α - и β -распаде" *ЖЭТФ* **11** 207 (1941); Migdal A "Ionization of atoms accompanying α - and β -decay" *J. Phys. Acad. Sci. USSR* **4** 449 (1941)
- Yi D et al. "Direct observation of the Migdal effect induced by neutron bombardment" *Nature* **649** 580 (2026) DOI:10.1038/s41586-025-09918-8
- Александров А Б и др. "Поиск слабовазаимодействующих массивных частиц тёмной материи: состояние и перспективы" *УФН* **191** 905 (2021); Aleksandrov A B et al. "Search for weakly interacting massive dark matter particles: state of the art and prospects" *Phys. Usp.* **64** 861 (2021)
- Беляев С Т и др. "Аркадий Бенедиктович Мигдал (К семидесятилетию со дня рождения)" *УФН* **133** 737 (1981); Belyaev S T et al. "Arkadii Benediktovich Migdal (on his seventieth birthday)" *Sov. Phys. Usp.* **24** 336 (1981)
- Беляев С Т и др. "Памяти Аркадия Бенедиктовича Мигдала" *УФН* **161** (8) 187 (1991); Belyaev S T et al. "Arkadii Benediktovich Migdal (Obituary)" *Sov. Phys. Usp.* **34** 733 (1991)
- Амусья М Я "Атомные ядра, пионная конденсация и кое-что ещё. (К столетию со дня рождения Аркадия Бейнусовича Мигдала)", Трибуна УФН № 109 (2011) DOI:10.3367/UFNr.2011.03.t109
- Nagata Y et al. "Observation of positronium diffraction" *Nature Commun.* **17** 1159 (2026) DOI:10.1038/s41467-025-67920-0, published: 23 December 2025
- Есеев М К, Мешков И Н "Ловушки для накопления заряженных частиц и античастиц в прецизионных экспериментах" *УФН* **186** 321 (2016); Eseev M K, Meshkov I N "Traps for storing charged particles and antiparticles in high precision experiments" *Phys. Usp.* **59** 304 (2016)
- Yamaguchi K, Kempf A "Encrypted qubits can be cloned" *Phys. Rev. Lett.* **136** 010801 (2026) DOI:10.1103/y4y1-1ll6
- Никитов С А, Назаров Л Е "Труды академика В.А. Котельникова (период 1932–1946 гг.) — основа научных направлений шифрования, криптографии и потенциальной помехоустойчивости" *УФН* **195** 1282 (2025); Nikitov S A, Nazarov L E "Academician V.A. Kotelnikov's works (1932–1946) — the basis of research fields in encryption, cryptography, and potential noise immunity" *Phys. Usp.* **68** 1212 (2025)
- Арбеков И М, Молотков С Н "Одноразовый блокнот Вернама, Котельникова, Шеннона и квантовая криптография" *УФН* **195** 1021 (2025); Arbekov I M, Molotkov S N "Vernam's, Kotelnikov's, and Shannon's one-time pad and quantum cryptography" *Phys. Usp.* **68** 963 (2025)
- Арбеков И М, Молотков С Н "Об экстракции квантовой случайности" *УФН* **191** 651 (2021); Arbekov I M, Molotkov S N "Extraction of quantum randomness" *Phys. Usp.* **64** 617 (2021)
- Трушечкин А С и др. "Стойкость метода обманных состояний в квантовой криптографии" *УФН* **191** 93 (2021); Trushechkin A S et al. "Security of the decoy state method for quantum key distribution" *Phys. Usp.* **64** 88 (2021)
- Молотков С Н "Квантовая криптография и теоремы В.А. Котельникова об одноразовых ключах и об отсчетах" *УФН* **176** 777 (2006); Molotkov S N "Quantum cryptography and V A Kotelnikov's one-time key and sampling theorems" *Phys. Usp.* **49** 750 (2006)
- Штермер Х "Дробный квантовый эффект Холла" *УФН* **170** 304 (2000); Stormer H L "Nobel Lecture: The fractional quantum Hall effect" *Rev. Mod. Phys.* **71** 875 (1999)
- Девятков Э В "Краевые состояния в режимах целочисленного и дробного квантовых эффектов Холла" *УФН* **177** 207 (2007); Deviatov E V "Edge states in the regimes of integer and fractional quantum Hall effects" *Phys. Usp.* **50** 197 (2007)
- Kim J et al. "Aharonov–Bohm interference in even-denominator fractional quantum Hall states" *Nature* **649** 323 (2026) DOI:10.1038/s41586-025-09891-2
- Alemanno F et al. (DAMPE Collab.) "Observations of the Fermi bubbles and the Galactic center excess with the DARK Matter Particle Explorer", arXiv:2512.23458, DOI:10.48550/arXiv.2512.23458