

1. Проверка принципа эквивалентности

Согласно слабому принципу эквивалентности (ПЭ), справедливому в рамках Общей теории относительности, все тела независимо от их состава падают в гравитационном поле с одинаковым ускорением, но некоторые теории предсказывают нарушение ПЭ. Исследователи из Французского центра аэрокосмических исследований ONERA и Обсерватории Лазурного берега в эксперименте, проведенном на спутнике MICROSCOPE, выполнили проверку ПЭ с рекордной точностью $\sim 10^{-14}$. На борту спутника имеются два полых коаксиальных цилиндра, свободно подвешенных в невесомости. Внутренний цилиндр изготовлен из сплава платины и родия, а внешний — из сплава титана, алюминия и ванадия. Для контроля имелась вторая такая же система, но с цилиндрами из одинакового материала (сплав Pt и Rh). С помощью электростатических сенсоров измерялись силы, необходимые для удержания внутренних и внешних цилиндров неподвижно относительно друг друга. Наличие сигнала, промодулированного с частотой вращения спутника, свидетельствовало бы о нарушении ПЭ. Такого нарушения пока не обнаружено, и параметр Этвеша был ограничен величиной $\delta(\text{Ti, Pt}) = [-1 \pm 9(\text{стат.}) \pm 9(\text{сист.})] \times 10^{-15}$. Этот результат на порядок улучшает предшествующее ограничение. В течение многих лет лучшим по точности (на уровне $\sim 10^{-12}$) оставался результат эксперимента В.Б. Брагинского и его коллег, выполненного в МГУ (см. *УФН* 105 779 (1971), *УФН* 179 3 (2009)).

Источник: *Phys. Rev. Lett.* **119** 231101 (2017)
<https://arxiv.org/abs/1712.01176>

2. Поиск аксионов

Изначально аксионное поле было предложено для объяснения отсутствия *CP*-нарушения в сильных взаимодействиях, однако кванты этого поля — аксионы — оказались хорошими кандидатами на роль частиц темной материи. При взаимодействии с когерентно осциллирующим аксионным полем электрические дипольные моменты нуклонов будут испытывать осцилляции, что отразится на характере прецессии их спинов. С. Abel (Сассекский университет, Великобритания) и др. сообщили о новых результатах поиска аксионов из данных эксперимента Sussex-RAL-ILL, который выполнялся в 1998–2002 гг. в Институте Лауэ–Ланжевена (Франция). Измерялось отношение частот прецессии спинов ультрахолодных нейтронов и атомов ^{199}Hg в ловушке с магнитным и электрическим полями. Предполагалось, что аксионное поле составляет темную материю в Галактике, поэтому известна её локальная плотность и скорость. Аномальная прецессия не обнаружена, но получены ограничения на массы аксионов m_a и константы связи аксионного поля с глюонами и нуклонами. В частности, исключены массы $10^{-24} \leq m_a \leq 10^{-17}$ эВ. Новые лабораторные ограничения на константы связи на три порядка величины лучше астрофизических ограничений.

Источник: *Phys. Rev. X* **7** 041034 (2017)
<https://doi.org/10.1103/PhysRevX.7.041034>

3. Фотоядерные реакции в грозовом разряде

Т. Enoto (Киотский университет, Япония) и др. сообщили о наблюдении гамма-лучей, которые генерируются фотоядерными реакциями и аннигиляцией позитронов e^+ при грозовых разрядах. Молнии являются естественными ускорителями частиц (см. обзор А.В. Гуревича и К.П. Зыбина в *УФН* 171 1177 (2001)). Лавины убегающих e^- , которые развиваются в сильных электрических полях, испускают тормозное γ -излучение. Подобные γ -вспышки ранее уже регистрировались наземными детекторами и с борта самолетов, а также наблюдались космическими телескопами как γ -всплески земного происхождения. Теоретически предсказывалось, что энергия этих γ -лучей достаточна для инициации фотоядерных реакций в атмосфере. Такие реакции ранее со статистической

достоверностью не наблюдались, хотя сообщалось о регистрации нейтронов и e^+ , которые, предположительно, рождаются в этих реакциях. В частности, появление n при молниях было отмечено на Тянь-Шаньской горной станции (см. *УФН* 182 568 (2012)). Т. Enoto и др. 6 февраля 2017 г. зарегистрировали с расстояния 0,5–1,7 км от грозового разряда γ -вспышку длительностью менее 1 мс, одновременно с молнией. Затем наблюдалось γ -излучение, которое экспоненциально затухало в течение 200 мс, а также дополнительный запаздывающий импульс со спектральным максимумом при 0,511 МэВ. Интерпретацией этих наблюдений является следующая цепочка событий. Одновременная с молнией γ -вспышка вызвана тормозным излучением e^- в разрядном канале. Гамма-фотоны взаимодействовали с молекулами воздуха с образованием нестабильных ядер ^{13}N и n в реакции $^{14}\text{N} + \gamma \rightarrow ^{13}\text{N} + n$. Нейтроны взаимодействовали с ^{14}N с образованием ядер ^{14}C и ^{15}N в возбужденном состоянии, а при их переходе в основное состояние излучались γ -фотоны с энергиями $< 10,8$ МэВ, которые наблюдались после молнии. Затем происходили β^+ -распады ядер ^{13}N в стабильные ядра ^{13}C с испусканием e^+ . Аннигиляция e^+e^- давала наблюдаемый γ -сигнал с энергией 0,511 МэВ, соответствующей массе e^+ . При этом минутная задержка по времени от момента грозового разряда соответствует направлению и скорости ветра, который перенёс облако с ядрами ^{13}N к детекторам. Описываемые наблюдения дают убедительные свидетельства того, что в грозовых разрядах действительно имеют место фотоядерные реакции.

Источник: *Nature* **551** 481 (2017)
<https://doi.org/10.1038/nature24630>

4. Вариации гравитационного поля при землетрясениях

Землетрясение приводит к перемещению больших масс грунта, что ведёт к изменениям гравитационного поля. В отличие от упругих *P*-волн, распространяющихся в коре и в верхней мантии Земли со скоростью 6–10 км с^{-1} , возмущения гравитационного поля движутся со скоростью света. М. Vallee (Университет Париж Дидро, Франция) и его коллеги выполнили косвенную регистрацию этих возмущений во время землетрясения магнитудой 9,1 в Тохоку (Япония) в 2011 г. Использовались данные 11 сейсмических станций, расположенных в Азии на удалении 1–2 тыс. км от очага землетрясения. Возмущения гравитационного поля от землетрясения создавали вблизи этих станций вторичные сейсмические волны, причём суммарно гравитационные и вторичные сейсмические сигналы вызывали вариации ускорения ~ 1 нм с^{-2} , которые регистрировались сейсмическими станциями раньше первичных *P*-волн. Регистрация гравитационных возмущений даёт новый важный канал информации о сильных землетрясениях.

Источник: *Science* **358** 1164 (2017)
<https://doi.org/10.1126/science.aao0746>

5. Квазар на красном смещении $z = 7,54$

Е. Banados (Обсерватория института Карнеги в Пасадене, США) и др. обнаружили квазар при красном смещении $z = 7,54$, когда возраст Вселенной составлял всего 690 млн лет (прежний рекорд $z = 7,09$). Боллометрическая светимость квазара соответствует массе чёрной дыры (ЧД) $8 \times 10^8 M_\odot$. Если предполагать, что эта ЧД непрерывно увеличивала массу при аккреции в эддингтоновском режиме, то на красном смещении $z \sim 40$ уже должны были существовать ЧД с массами $\geq 10^4 M_\odot$, происхождение которых остаётся загадкой. Особенности спектра говорят о том, что квазар наблюдается в то время, когда окружающий его газ был в значительной степени нейтральным, т.е. процесс реионизации ещё не был завершён.

Источник: *Nature*, онлайн-публикация от 6 декабря 2017 г.
<https://arxiv.org/abs/1712.01860>

Подготовил Ю.Н. Ерошенко
 (e-mail: erosh@ufn.ru)