

1. Рождение t-кварков в столкновениях тяжёлых ионов. В ранней Вселенной при высоких температурах кварки и глюоны были свободными (находились в состоянии деконфаймента), образуя кварк-глюонную плазму, и эти условия уже удаётся частично воспроизводить на ускорителях. Коллаборация ATLAS представила новые данные по рождению пар кварков $t\bar{t}$ при столкновении ионов свинца $Pb+Pb$ на Большом адронном коллайдере с энергией в системе центра масс 5 ТэВ [1]. Так как в эксперименте кварк-глюонная плазма имеет очень малое время жизни ($\sim 10^{-23}$ с), её исследование проводится путём регистрации рождающихся в плазме и вылетающих частиц. Отбирались события распада t-кварков на b-кварки в низкофононом дилептонном канале — вместе с электронами и мюонами. Критерием отбора являлось также наличие двух струй. В результате рождение t-кварков в кварк-глюонной плазме зарегистрировано с достоверностью 5σ , а измеренное сечение их рождения составляет $\sigma_{t\bar{t}} = 3,6_{-0,9}^{+1,0}$ (стат.) $_{-0,5}^{+0,8}$ (сист.) мкбн и согласуется с результатами теоретических расчётов. Как показало данное исследование, в условиях ранней Вселенной в кварк-глюонной плазме присутствовали все типы кварков. В России в ОИЯИ (г. Дубна) приступает к работе ускорительный комплекс NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility), где также будут производиться столкновения тяжёлых ионов с протонами и фиксированными мишенями с целью изучения свойств плотной барионной материи.

2. Тень светового луча. Обычно считается, что тень могут отбрасывать только предметы, состоящие из атомов. R.A. Abrahao (Оттавский университет, Канада и Брукхейвенская национальная лаборатория, США) и соавторы впервые продемонстрировали появление тени в случае, когда внутри кристалла рубина $Al_2O_3:Cr$ пересекаются два луча света [2]. Луч зелёного лазера с длиной волны 532 нм служил предметом, а синий луч с длиной волны 450 нм его пересекал, и в синем луче на экране был виден силуэт зелёного луча с контрастом 22%. Объяснением данного эффекта является нелинейный процесс обратного насыщения поглощения. Если в большинстве веществ под действием лазерного излучения прозрачность увеличивается (могла бы появиться "антитень"), то в рубине она, наоборот, уменьшается. Это происходит из-за взаимодействия двух квантовых уровней посредством фононов. Быстрые переходы между этими уровнями, которые можно назвать распадом верхнего уровня, и приводят к поглощению фотонов голубого света. Хотя взаимодействие фотонов через нелинейную среду наблюдалось и ранее, в новом эксперименте впервые продемонстрированы все основные атрибуты тени. Например, тень повторяет форму предмета и видна невооружённым глазом.

3. Проверка Общей теории относительности (ОТО). Наблюдения с помощью космического телескопа Радиоастрон, работающего в режиме интерферометра со сверхдлинной базой, позволили получить множество важных научных результатов [3]. Но, помимо радиоастрономии, коммуникационные сигналы Радиоастрона, которыми он обменивался с Землёй, представили возможность проверить общерелятивистский эффект гравитационного красного смещения в новых условиях. Спутник двигался по вытянутой орбите, достигая в апогее удаления 350 тыс. км от Земли. Разность гравитационных потенциалов U приводила к различию скорости хода атомных часов на спутнике и на наземной станции слежения. В предшествующем эксперименте Gravity-Probe A водородный стандарт времени поднимался на ракете на высоту 10^4 км, и точность измерения гравитационного красного смещения достигала $\approx 1,4 \times 10^{-4}$, а на спутниках Галилео была получена точность $\sim 3 \times 10^{-5}$. В.Н. Руденко (ГАИШ им. П.К. Штернберга МГУ) и его коллеги из нескольких российских организаций смогли достичь в эксперименте на

Радиоастроне точности $\varepsilon = (1,57 \pm 3,96) \times 10^{-5}$, где параметр ε характеризует отклонение от предсказаний ОТО в виде $\Delta f/f = (1 + \varepsilon)\Delta U/c^2$, где c — скорость света [4]. Применялась методика измерений с компенсацией эффекта Доплера первого порядка со сменой режимов синхронизации (переключениями между одно- и двухпутевыми режимами). Также была решена сложная задача по учёту других эффектов, вызывающих сдвиг частоты f , таких как приливные потенциалы Луны и Солнца, влияние несферичности Земли, атмосферный сдвиг (включая ионосферу и тропосферу), фликкер-шумы мерцания, эффект отстройки двух стандартных частот. Полученная величина $\varepsilon = (1,57 \pm 3,96) \times 10^{-5}$ согласуется с предсказываемым ОТО нулевым значением. Этот результат также вполне согласуется с измерениями, выполненными на спутниках "Галилео". Однако на Радиоастроне позиционная инвариантность эффекта гравитационного красного смещения проверена в гораздо больших масштабах (350 тыс. км) по сравнению с измерениями на спутниках "Галилео" (≈ 20 тыс. км), что делает описываемый результат новым важным достижением. О других интересных возможностях экспериментальной проверки ОТО см. в [5].

4. Раннее формирование галактик. Наблюдения с помощью телескопа им. Дж. Уэбба показали, что галактики в ранней Вселенной формировались раньше и в больших количествах, чем предсказывает стандартная космологическая Λ CDM-модель, и это расхождение пока не имеет надёжного объяснения. Частью этой проблемы является наличие на больших красных смещениях уже сформировавшихся больших галактик. М. Хяо (Женевский университет, Швейцария) и соавторы получили спектроскопическое подтверждение для ещё трёх подобных галактик на красных смещениях $z \sim 5-6$ [6]. Барионное вещество в них должно было трансформироваться в звёзды в 2–3 раза более эффективно, чем в типичных галактиках на меньших z . При этом их звёздная масса составляет примерно $10^{11} M_{\odot}$, т.е. 50% всех барионов должно было перейти в звёзды, что затруднительно объяснить в существующих моделях. S.S. McGaugh (Кейс-Вестерн-Резерв университет, США) и соавторы выполнили новый анализ имеющихся наблюдательных данных и результатов ряда численных моделирований и пришли к выводу, что весьма вероятен механизм образования по меньшей мере части галактик не иерархическим путём (в результате слияний более мелких галактик или протогалактик), а по так называемому монолитическому механизму, когда галактика со звёздами образуется целиком уже в раннюю эпоху и сохраняется в почти неизменном виде до поздних времён [7]. Как полагают авторы работы [7], такой процесс формирования галактик возможен в модифицированной теории гравитации MOND. Хотя MOND пока не объясняет весь массив наблюдательных данных по тёмной материи, в данном случае она предсказывает раннее формирование галактик по монолитическому механизму. Для решения проблемы раннего образования галактик предлагались также модели с нестандартным спектром возмущений и модели с первичными чёрными дырами.

Список литературы

1. Aad G et al. (ATLAS Collab.), arXiv:2411.10186, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.10186>; submitted to *Phys. Rev. Lett.*
2. Abrahao R A et al. *Optica* **11** 1549 (2024) <https://doi.org/10.1364/OPTECA.534596>
3. Кардашев Н С *УФН* **179** 1191 (2009); Kardashev N S *Phys. Usp.* **52** 1127 (2009)
4. Руденко В Н и др. *ЖЭТФ* **166** 632 (2024) <https://doi.org/10.31857/S0044451024110063>
5. Руденко В Н, Орешкин С И, Руденко К В *УФН* **192** 984 (2022); Rudenko V N, Oreshkin S I, Rudenko K V *Phys. Usp.* **65** 920 (2022)
6. Xiao M et al. *Nature* **635** 311 (2024) <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08094-5>
7. McGaugh S S et al. *Astrophys. J.* **976** 13 (2024) <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad834d>