

QUORKS IN NUCLEUS

G. A. LEKSIN

The article discusses the quark degrees of freedom in nuclei and fluctons, as well as their properties.

Рассмотрены современные представления о кварковых степенях свободы в ядрах, флуктонах и их свойствах.

КВАРКИ В ЯДРАХ

Г. А. ЛЕКСИН

Московский физико-технический институт,
Долгопрудный Московской обл.

ВВЕДЕНИЕ

Уже давно в школьные учебники вошли утверждения, что вещество состоит из молекул, молекулы — из атомов, которые представляют собой планетарные системы, где электроны по определенным орбитам вращаются вокруг ядер. Сами ядра состоят из элементарных частиц: протонов и нейтронов.

Помимо электронов, протонов и нейтронов, из которых построено окружающее нас вещество, были открыты другие элементарные частицы и их античастицы. Их число и разнообразие велики, их больше, чем элементов и даже изотопов в Периодической таблице Менделеева. Напомним, что античастицы обладают той же массой, что и частицы, но с противоположными свойствами или, лучше сказать, противоположными квантовыми числами.

Так вот обилие элементарных частиц и наблюдающиеся симметрии в их свойствах позволили сначала предположить, а затем обнаружить в экспериментах, что большинство элементарных частиц вовсе не элементарны, а состоят из более простых объектов: кварков и антикварков. Кварков всего *шесть* сортов, правда, в каждом сорте по *три* кварка, которые отличаются новым квантовым числом, названным *цветом*. Элементарные частицы бывают только белые, то есть содержат либо пару кварк—антикварк, либо белую комбинацию из трех кварков основных цветов (отсюда условное название *цвет*).

Вещество не устроено как матрешка, не повторяет предыдущий уровень на следующем микроуровне. Каждый уровень полон своего многообразия (своей отрасли или отраслей знания, своей практической ценности), обнаруживает принципиальные мировоззренчески новые свойства. Несколько пояснений. На уровне молекул и атомов появилось понятие “валентность”; на уровне ядер — понятие дефекта массы, которое позволило рассматривать легкие (даже без массы) объекты построенными из более тяжелых частиц. Дефект масс для ядер сказывается в том, что масса ядер меньше массы нуклонов (нейтронов и протонов) в ядрах, что обуславливает их связь, $\Delta = \epsilon_{\text{св}}$, где $\epsilon_{\text{св}}$ — энергия связи нуклонов в ядре. На уровне элементарных частиц утвердилось понятие виртуальной частицы, то есть частицы, существующей очень короткое время $\approx \hbar/m$ и отлетающей от испускающей ее частицы на расстояние $\hbar/p$, где m и p — масса и импульс виртуальных частиц. Понятие виртуальной частицы нетривиально. Есть вопрос о правомерности применения к ней слова “существующей”. Может быть, это лишь след

математического описания? Представление о виртуальной частице как реальности противоречит законам сохранения энергии и импульса. К примеру, когда говорят, что нуклон окружен “шубой” пионов или нуклоны взаимодействуют, обмениваясь пионами, говорят о виртуальных пионах. Существуют ли они? Современный ответ: да. Но на малые времена и на малых расстояниях. Закон сохранения энергии и импульса нарушается на то же короткое время и на тех малых расстояниях, которые были оценены выше.

Виртуальные частицы могут реализоваться, если передать им энергию так, чтобы их образование не противоречило закону сохранения импульса и энергии. Осознание этой возможности приводит к ярким картинам, например движущееся тело с энергией, соответствующей нескольким ГэВ/нуклон, “выворачивает” из вакуума вдоль своей траектории куски вещества и антивещества. Уже сегодня быстрые протоны образуют пары дейтрон–антидейтрон, гелий–антигелий. Сам вакуум непрерывно кипит, порождая самые разнообразные виртуальные частицы.

На уровне кварков мы встретились с новым, неожиданным и пока до конца непонятым явлением — конфайнментом, невылетанием кварков. Кварки, частицы с дробным электрическим и барионным зарядами и новым квантовым числом — цветом, не могут быть в свободном состоянии, они замкнуты в области порядка размера элементарных частиц. Сила взаимодействия между кварками, обусловленная обменом так называемыми глюонами, растет с расстоянием, как сила в растянутой пружине, что связано с тем, что глюон также имеет цветной заряд. В ряде моделей считается, что кварки “живут” в пузырьках в вакууме и удерживаются поверхностным давлением этих пузырьков.

Уже создана теория, так называемая квантовая хромодинамика, которая описывает поведение кварковых систем в вакууме. Квантовохромодинамические расчеты на качественном уровне, а для некоторых случаев (например, водородоподобных систем из двух тяжелых кварков) на точном количественном уровне описывают экспериментальные данные.

Понятия о кварках и их свойствах, конечно, непросты и непривычны. Это мировоззренческое достижение современной физики, и потому оно с неизбежностью должно войти в школьные учебники.

КУМУЛЯТИВНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Перейдем теперь на фоне общей картины к обсуждению кварковых степеней свободы в ядрах, чему специально посвящена эта статья, и попытаемся на конкретном примере понять, как добываются сведения для общей картины строения вещества.

На первый взгляд вопрос о кварках в ядрах тривиальный: ядра состоят из протонов и нейтронов, а они — из кварков, следовательно, ядра состоят из кварков. Это правильно. Но вопрос не в этом. Во-

прос в том, собираются ли сначала кварки в ядерной материи в нуклоны, из которых и состоит ядро.

На рис. 1 показан спектр нейтронов, вылетающих из ядер под действием протонов с энергией 7,5 ГэВ под углом 119° в лабораторной системе. На рисунке по оси ординат отложена величина f , которая имеет смысл сечения, отнесенного к единице доступного фазового объема реакции. По оси абсцисс отложена кинетическая энергия T_n нейтрона.

Видна большая вероятность испускания ядром относительно медленных нейтронов с энергией порядка 10 МэВ (нейтроны рассматриваются здесь потому, что нейтрон с энергией менее 10 МэВ легче измерять, чем протоны такой же энергии, которые быстро замедляются в веществе. Но все замечания, которые будут сделаны относительно спектра на рис. 1, будут, конечно, относиться и к протону). Если функцию f описывать в виде e^{-T/T_0} , то ее наклон T_0 при малых T — порядка энергии связи нуклонов в ядре 5–8 МэВ. Происхождение этих нуклонов, которые были давно обнаружены и исследованы, достаточно ясно: это фрагменты развалившегося ядра. Развал ядра хорошо описывается моделью испарения при температуре порядка 5 МэВ. Испарение — медленный равновесный процесс, идущий с характерными временами порядка 10^{-19} – 10^{-20} с, что много больше по сравнению со временем прямой реакции 10^{-23} с.

Но в спектре нейтронов есть излом, свидетельствующий о наличии какого-то другого процесса, связанного с образованием быстрых нейтронов. Наклон спектра, характеризующий процесс образования этих нейтронов, в десять раз больше, чем для испарения. Каким объектам отвечает такая энергия связи? Мы знаем сегодня, что нуклоны с энергией порядка сотен мегаэлектрон-вольт вылетают из

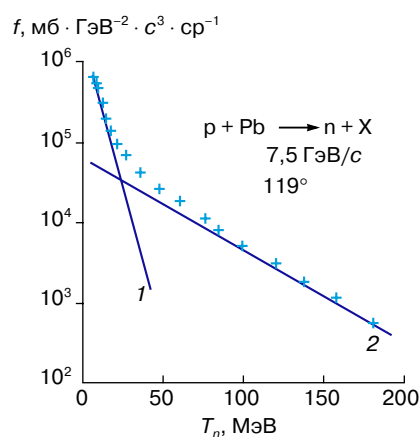


Рис. 1. Зависимость инвариантной функции кумулятивных нейтронов от их кинетической энергии: 1 — испарительные, 2 — кумулятивные нейтроны. Шкала ординат логарифмическая.

ядер быстро, за время прямой реакции 10^{-23} с. Какую процессу обязано образование этих нуклонов?

При больших энергиях налетающих частиц — а показанный спектр, напомним, был получен при энергии налетающих протонов 7,5 ГэВ — обычно считалось, что налетающий нуклон взаимодействует с отдельным, почти свободным нуклоном ядра (что хорошо согласуется с высказыванием о том, что ядра состоят из нуклонов, кстати сказать из виртуальных нуклонов). Детальные эксперименты, которые я не буду здесь рассматривать, показывают, что, строго говоря, упомянутая картина верна лишь в определенных условиях. А в нашем случае приведен спектр нейтронов, вылетающий в лабораторной системе координат назад, куда, согласно закону сохранения энергии и импульса, вылет нейтронов запрещен.

Рассмотрим простую задачу столкновения двух шариков одинаковой массы, а нуклоны с точки зрения законов сохранения энергии и импульса сталкиваются как шарики. Закон сохранения импульсов дает в векторной форме

$$\mathbf{p}_0 = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2,$$

где $\mathbf{p}_0$ — импульс налетающего шарика на покоящийся шарик, $\mathbf{p}_1$ и $\mathbf{p}_2$ — импульсы шариков после столкновения. В силу закона сохранения энергии

$$p_0^2 = p_1^2 + p_2^2,$$

то есть треугольник $\mathbf{p}_0\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2$ прямоугольный, вокруг него можно описать окружность, на которой лежат концы векторов импульсов шариков после разлета, а это значит, что угол разлета двух шариков 90° , максимальный угол вылета одного шарика относительно направления $\mathbf{p}_0$ составляет 90° , и то с нулевым импульсом. Релятивистское рассмотрение превращает окружность в эллипс и лишь усугубляет выводы. Любые неупругие процессы также делают максимальный угол вылета лишь меньше. Итак, нейтрон в рамках модели столкновения с покоящимся нуклоном не может вылететь назад в лабораторной системе координат. Наблюдаемые быстрые нейтроны, называемые кумулятивными, имеют другое происхождение.

Шарик отлетает назад при столкновении со стенкой или шариком, который тяжелее его. Чем тяжелее шарик-мишень, тем больший импульс или большую энергию может иметь шарик, отлетевший назад. Можно вычислить минимальную массу объекта, с которым должна столкнуться налетающая частица, чтобы под данным углом могла вылететь кумулятивная частица с данной энергией. Эта масса, нормированная на массу нуклона, называется кумулятивным числом. Итак, кумулятивные нейтроны могут образоваться и образуются при столкновении налетающей частицы с несколькими нуклонами ядра.

Раньше было дано строгое определение кумулятивной частицы: это такая частица, которая не могла образоваться в силу законов сохранения энергии и импульса при взаимодействии налетающей частицы со свободным нуклоном. Полезно, наверное, пояснить происхождение термина *кумулятивная частица*, ее связь с более привычными понятиями *кумулятивный снаряд*, *кумулятивная струя*. Латинский глагол *cumulo* в основе слова (накапливать) означает накопление энергии объекта на какой-то части объекта. В тяжелом снаряде его часть после столкновения имеет энергию большую, чем эта часть имела в движущемся снаряде, соответственно она имеет и большую скорость, чем снаряд. А это значит, что в системе координат, где покоится снаряд, появится частица, летящая в сторону, противоположную движению мишени. В рассматриваемом случае роль снаряда выполняет ядро, а движущийся назад в системе координат, где ядро покоится, нейтрон выполняет роль кумулятивной частицы.

ФЛУКТОНЫ

На рис. 2 показаны спектры кумулятивных протонов, π^+ - и π^- -мезонов, K^+ - и K^- -мезонов и антипротонов, вылетающих из ядра меди под углом 119° ,

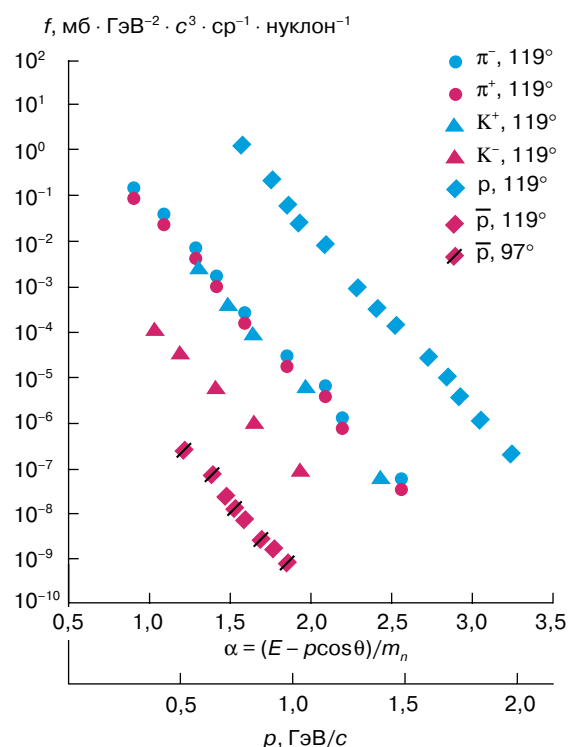


Рис. 2. Зависимость инвариантных функций различных кумулятивных частиц от их величин α . Нижняя шкала абсцисс — импульс кумулятивных протонов при соответствующем α .

под действием протонов с энергией 10 ГэВ в зависимости от величины $\alpha = (E - pc \cos \theta)/m_n$, которая практически совпадает при большой начальной энергии с кумулятивным числом (нижняя шкала относится к спектру протонов, на котором мы сначала сосредоточимся, и показывает соответствующий импульс). Надо обратить внимание на то, что шкала по оси ординат опять-таки логарифмическая и в серии экспериментов, в которой был получен график рис. 2, измеряемые величины менялись на 12 порядков, то есть в тысячу миллиардов раз, что само по себе говорит о трудности и уровне эксперимента.

Спектр протонов хорошо согласуется с показанным на рис. 1 спектром нейтронов и продолжает его вплоть до больших значений α или больших импульсов и энергии вторичных протонов. Это значит, что в эксперименте удалось зарегистрировать прямое взаимодействие налетающих протонов более чем с четырьмя нуклонами. Чтобы обеспечить такое взаимодействие, нуклоны должны находиться на малых расстояниях, меньших, чем размер нуклона, и меньших, чем расстояние между кварками в нуклонах. В самом деле, чтобы передать вылетающему нуклону импульс 1 ГэВ/с = 1000 МэВ/с, надо, чтобы нуклоны мишени сблизились до расстояния $\approx 1/7$ ферми (Φ). Переданный импульс в 140 МэВ/с соответствует размерам $1 \Phi = 10^{-13}$ см. В нуклоне три кварка, и расстояние между ними $\approx 1 \Phi$.

Так что же за объект, который распадается на кумулятивные частицы? Это тесная группа нуклонов, скорее всего потерявших индивидуальность и ставших единым кварковым мешком. Но это, по-видимому, не мешки с дискретным числом кварков 3, 6, 9, 12, так как на спектрах не видно особенностей при соответствующих массах двух, трех нуклонов. Это локальные флуктуации плотности ядерной материи — флуктоны.

Внутри ядер не царит покой. Быстро пролетающая через ядро частица в глубинах ядра (на поверхности плотность меньше, и там кварки действительно собраны в квазинуклоны) застает и фиксирует бурно флуктуирующую кварковую материю, флуктон — его мгновенная элементарная частица. И что замечательно, это, по-видимому, очень плотное образование. Размер флуктона порядка размера нуклона, но в этой области собрано число кварков больше, чем в отдельных нуклонах.

ЯДЕРНЫЙ СКЕЙЛИНГ И СУПЕРСКЕЙЛИНГ

Заметим, что речь все время идет не о свойствах конкретного взаимодействия налетающей частицы данного сорта и данной энергии с конкретным ядром, а о свойствах ядерной материи, хотя представлены, конечно, конкретные данные. Это замечание справедливо, так как реакции с образованием кумулятивных частиц обладают, начиная с некоторой

энергии, удивительными свойствами, совокупность которых названа *ядерным скейлингом*. Суть явления в том, что форма спектра кумулятивных частиц не зависит от сорта и энергии налетающей частицы и атомного номера ядра-мишени. Сами выходы кумулятивных частиц, если их нормировать на вероятность взаимодействия налетающей частицы с ядром (на полное неупругое сечение), также не зависят от сорта и энергии налетающей частицы. На графике рис. 3 показана зависимость T_0 для разных налетающих частиц от энергии E_0 этих частиц. Видно, что T_0 от E_0 не зависит. Данные рис. 4 показывают удивительное постоянство формы для самых

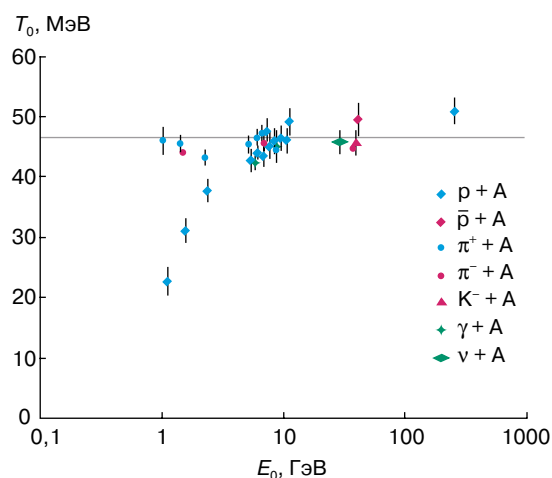


Рис. 3. Зависимость наклонов инвариантных функций кумулятивных протонов, вылетающих под углом 120° , от энергии различных налетающих частиц.

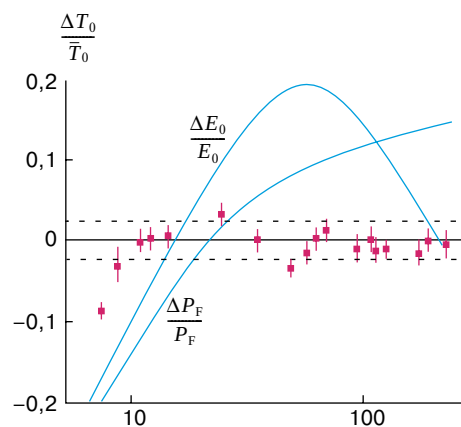


Рис. 4. Зависимость разности наклонов инвариантной функции кумулятивных протонов, нормированных на средний наклон, от массы ядра мишени. Кривые представляют относительные изменения энергии связи и фермиевского импульса для разных ядер-мишеней.

разных ядер. На графике по оси ординат показаны отношения отклонения наклонов спектров от среднего наклона к среднему наклону. Постоянство наклонов сохраняется по всей Периодической таблице элементов (начиная с ядра Be) с точностью не хуже 2%, что меньше, чем изменения по таблице энергии связи нуклонов в ядрах, которое отражает свойство ядра данного типа. Само по себе выявление сохраняющихся величин, как всякое наблюдение симметрии, важно, а в этом случае оно означает, что в реакциях с образованием кумулятивных частиц мы изучаем не свойства конкретных реакций, не свойства конкретных ядер на нуклонном уровне, а свойства ядерной материи, точнее, флуктонов ядерной материи.

Вернемся к рис. 2. Он иллюстрирует еще одно, более глубинное свойство, названное *суперскейлингом*: постоянство наклонов инвариантных функций для кумулятивных частиц разного сорта (протонов, π^+ и π^- -мезонов, K^+ и K^- -мезонов, антипротонов). Нуклон, как уже было сказано, состоит из трех разноцветных кварков, не обладающих странностью, шармом и т.д. По современным представлениям, в нуклоне есть еще целое море так называемых морских кварков и антикварков, порождаемых из вакуума глюонами со всеми возможными квантовыми числами. Так вот суперскейлинг, по-видимому, означает, что формы структурных функций, описывающих валентные и морские кварки в ядерной материи, совпадают. На языке термодинамики можно говорить про их равную температуру.

Выходы частиц, показанных на рис. 2, так же как во всех подобных изученных случаях, демонстрируют другие интересные закономерности. Выходы K^+ - и π^+ -мезонов при одинаковых значениях α одинаковы. Есть иерархия выходов, и она такова, что участие в составе вылетающей кумулятивной частицы кварков из кваркового моря ядра уменьшает вероятность образования соответствующей частицы пропорционально числу морских кварков (антикварков, странных кварков). Так, в пионах один валентный кварк и один антикварк из моря; в K^+ -мезоне также, только из моря взят странный антикварк, в K^- -мезоне два морских кварка (странный кварк и антикварк), в антипротоне три антикварка, в протоне три валентных кварка. Видно, как логично интерпретируются данные о суперскейлинге на кварковом языке, и это одно из свидетельств наличия кварковых степеней свободы в ядрах.

КВАРКГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА

Квантовохромодинамические расчеты показывают, что при определенных температурах и плотностях ядерного вещества оно может перейти в новое состояние — кваркглюонную плазму. Рис. 5 иллюстрирует ожидание. Здесь по оси ординат отложена температура, а по оси абсцисс — плотность, нормированная на плотность ядер, так что точка на

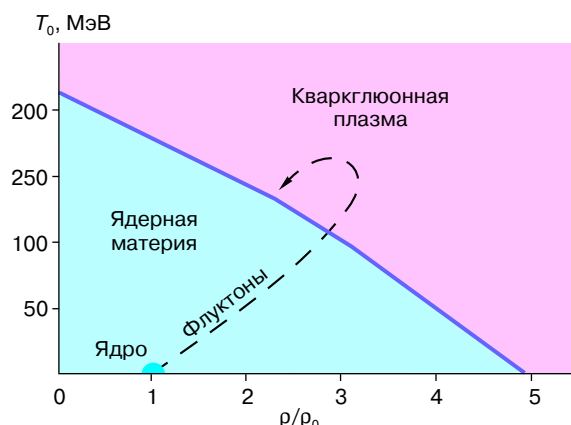


Рис. 5. Диаграмма фазового состояния вещества при различных температурах T и плотностях ρ/ρ_0 . Плотность дана относительно средней плотности ядра.

оси абсцисс при $\rho/\rho_0 = 1$ обозначает место, где находятся обычные ядра. Жирная линия — область перехода ядерного вещества в кваркглюонную плазму. Нетрудно видеть, что свойства флуктонов — температура, если за ее меру считать наклоны спектров кумулятивных частиц, и плотность, если считать его размеры равными размеру нуклонов, — таковы, что флуктон может быть каплей кваркглюонной плазмы. Кваркглюонная плазма (КГП) — такое состояние вещества, где нет индивидуальных нуклонов, нет отдельных многокварковых мешков. Если хотите, это один большой кварковый мешок с возбужденным кварковым морем. Не исключено, что КГП в природе может быть в очень плотных астрономических объектах и, вероятно, реализовалась в момент первичного взрыва.

Сегодня поиски КГП — заманчивая задача многих экспериментаторов в мире. Строятся большие установки, создаются ускорители тяжелых ионов на большие начальные энергии. Идея состоит в том, чтобы при столкновении тяжелых ионов, то есть многих нуклонов, образовалось в области столкновения как можно больше π -мезонов, которые и могут перейти при соответствующих (см. рис. 5) условиях в КГП. Мы не знаем, случится ли такое. Пока при освоенных энергиях убедительного проявления КГП при столкновениях ионов не обнаружилось. Может быть, изучение свойств флуктонов, подаренных природой плотных образований, позволит изучать КГП в краткие моменты существования флуктуаций.

Тут, правда, есть замечания. Кварковые плазмы бывают разные. Вообще говоря, КГП во флуктоне, если она там образуется, — это барионнонасыщенная плазма, а при столкновении ионов небарионнонасыщенная. Флуктон, по определению, не равновесный объект. И неясно пока, можно ли и как

применять к нему понятие из равновесной термодинамики, например такое, как температура. В то же время, может быть, флуктуации кварковой материи в ядрах — простейший объект неравновесной термодинамики. Долгое время считалось, что ядро — настолько сложный объект, что его надо изучать, изучив нуклон-нуклонное взаимодействие и сводя его к последнему. Мы уже видели, что нуклон сложен не менее ядра, но он еще не вполне “среда”. Может, надо идти от изучения кварков в среде, создавая квантовую хромодинамику сред, подобно тому как есть электродинамика сред с такими понятиями, как показатель преломления среды относительно вакуума, электродинамические потери энергии частицами при прохождении через среду, дисперсия энергетических потерь и т.д. В хромодинамике сред возникают вопросы: чему равен радиус конфаймента в ядерной материи, где присутствуют другие кварки и глюоны, как могут двигаться цветные кварки в ядерной среде, как и где — внутри или на границе ядра — кварки переходят в адроны (сильно взаимодействующие частицы), как говорят, адронизуются?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Видно, что к концу статьи нарастает число предположений, сомнений и вопросов без ответа. Это естественно, мы приблизились к границе исследований в заданном направлении. Сами добываемые знания лишь мазок на фундаментальной картине строения материи. Незавершенный мазок. Эксперименты продолжаются.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Майер В. Кумулятивный эффект в простых опытах. М.: Наука, 1989.

* * *

Георгий Александрович Лексин, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики высоких энергий Московского физико-технического института, главный научный сотрудник Института теоретической и экспериментальной физики. Область научных интересов: ядерная физика высоких энергий. Автор более 200 научных публикаций.