

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ – СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Одной из основных задач экспериментальных исследований в области ядерной физики является задача получения информации о строении атомного ядра. Она может быть получена, прежде всего, в ядерных реакциях. Такую информацию позволяет получать анализ вероятностей взаимодействия с ядром различных пробных частиц, угловых, энергетических, массовых и других распределений частиц-продуктов, энергий возбуждения конечного ядра и каналов его распада, исследованных при различных энергиях налетающих частиц. Среди огромного разнообразия ядерных реакций важное место занимают процессы, вызванные электромагнитными взаимодействиями – реакции под действием фотонов средних энергий, называемые также фотоядерными. Эти реакции протекают за счёт электромагнитного поля, свойства которого хорошо изучены, и механизм передачи энергии от γ -кванта ядру известен точно. В таких реакциях отделить эффекты структуры ядра от механизмов его возбуждения проще, чем в реакциях под действием нейтронов и заряженных частиц.

Для проведения исследований фотоядерных реакций используются различные экспериментальные методы. Основное их различие заключается в способах обеспечения условий, при которых эффективный спектр фотонов, вызывающих реакцию, в определенном приближении может рассматриваться как квазимоноэнергетический. Систематические исследования фотоядерных (прежде всего, фотонейтронных) реакций начались в 50-х годах XX столетия. Исторически первыми в этой области были эксперименты, выполненные на пучках тормозного γ -излучения электронных ускорителей – бетатронов, микротронов, линейных ускорителей. Они проводились во многих лабораториях - в Московском и Саратовском государственных университетах, Институте ядерных исследований РАН, Харьковском физико-техническом институте, университете Мельбурна в Австралии и некоторых других. Наибольшее количество данных этого типа было получено в Научно-Исследовательском Институте Ядерной Физики (НИИЯФ) МГУ. Одним из важных преимуществ таких экспериментов является высокая интенсивность пучка налетающих фотонов, позволяющая достигать в определяемых сечениях реакций высокой статистической точности. При максимальных энергиях налетающих фотонов до $E_m \sim 30$ МэВ, число регистрируемых событий достигает значений $\sim 10^6 - 10^7$. При этом относительные погрешности значений экспериментального результата составляют величины $\Delta Y/Y \sim (10^{-2} - 10^{-1})\%$. Вместе с тем, таким экспериментам присущ и определенный недостаток. Так как энергетический спектр тормозных γ -квантов является сплошным, непосредственно в эксперименте возможно измерять не сечение реакции, а ее выход - интеграл от произведения сечения с этим спектром. Как следствие, сечение реакции возможно получить лишь в результате решения неустойчивой обратной задачи восстановления сечения из выхода. Условия квазимоноэнергетического представления сечения реакции обеспечивались несколькими специально разработанными математическими методами, которые позволяли достигать в определяемом сечении реакции энергетического разрешения ~ 100 кэВ. Наиболее точные и достоверные результаты были получены в НИИЯФ МГУ при использовании метода «регуляризации», разработанного в МГУ под руководством академика А.Н.Тихонова.

С целью преодоления основного недостатка результатов фотоядерных экспериментов на пучках тормозных γ -квантов как альтернатива был разработан метод получения пучков квазимоноэнергетических фотонов, образующихся при аннигиляции на лету релятивистских позитронов. Идея этого метода была реализована к началу 60-х годов XX столетия на нескольких установках, созданных в лабораториях США, Франции и Германии. Наибольшее количество данных было получено на пучках электронных линейных ускорителей в Лоуренсовской Ливерморской национальной лаборатории (National Lawrence Livermore Laboratory) США в Ливерморе и Центре ядерных

исследований Франции (France Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay) в Саклэ. Экспериментальные установки обеих лабораторий были практически одинаковыми, различаясь лишь незначительными деталями. Преимущество метода аннигиляции позитронов заключалось в том, что в энергетическом спектре фотонов, налетающих на исследуемое ядро, кроме сплошного спектра от тормозящихся позитронов, аналогичного спектру от тормозящихся электронов, присутствует и достаточно узкая (шириной $\sim 200 - 400$ кэВ) линия от аннигиляции позитронов. Процесс получения аннигиляционных фотонов является многоступенчатым - 1) образование тормозного γ -излучения в процессах столкновений релятивистских электронов с толстой тяжелой мишенью ($e^- + A \rightarrow A + e^- + \gamma$); 2) - рождение электрон-позитронных пар тормозными фотонами ($\gamma + A \rightarrow A + e^- + e^+$); 3) - аннигиляция позитронов ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$). В связи с этим интенсивность «пучка» квазимоноэнергетических фотонов весьма невысока: обычно вероятность рождения электроном позитрона в конверторе не превышает $10^{-4} - 10^{-3}$, а выход аннигиляционных фотонов на один позитрон равен $\sim 10^{-4}$. В результате выход аннигиляционных фотонов на один позитрон составляет величину не более $10^{-8} - 10^{-7}$, что является серьезным недостатком метода. Более того, учет вклада тормозных фотонов требовал проведение эксперимента в 3 этапа - 1) измерение со спектром фотонов от позитронов, 2) измерение со спектром от электронов и 3) получение соответствующей разности. Это в дополнение к достаточно малому сечению аннигиляции позитронов в специальной тонкой мишени приводило к невысокой статистической точности в определяемом сечении реакции.

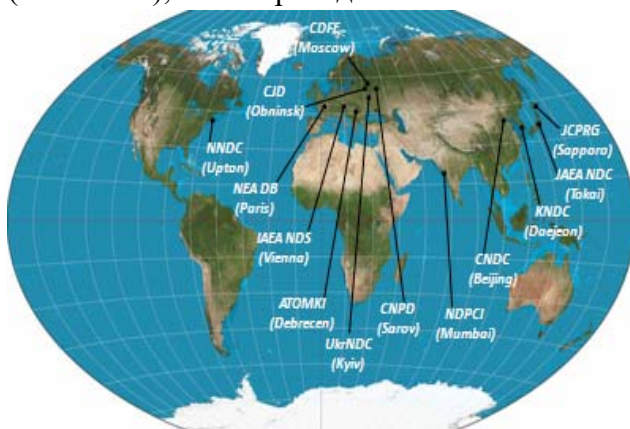
Исследования, выполненные для большого числа ядер в разных лабораториях на разных фотонных пучках в области энергий налетающих фотонов до ~ 30 MeV, дополняли друг друга и позволили обнаружить в сечениях различных реакций так называемый Гигантский Дипольный Резонанс (ГДР), который в 1945 году был теоретически предсказан академиком А.Б.Мигдалом. Было предсказано, что смещение под действием электромагнитной волны налетающих фотонов всех заряженных протонов ядра относительно всех его нейтронов приводит к появлению в сечениях реакций в области энергий ~ 20 МэВ, мощного и широкого максимума, который распадается преимущественно с испусканием нейтронов и протонов. На основе информации о сечениях различных фотонейтронных и фотопротонных реакций были определены основные характеристики ГДР, такие как энергетические положения, амплитуды и ширины ГДР. Было установлено также существенное различие характеристик ГДР в процессах образования нейтронов и протонов под действием γ -излучения. Было обнаружено, что в зависимости от свойств атомного ядра (деформация, особенности оболочечной структуры) единый мощный максимум ГДР может расщепляться на несколько менее выраженных резонансов (проявление так называемой структуры ГДР). Были исследованы эффекты изоспинового расщепления ГДР, определяемые соотношениями между числами нейтронов и протонов в составе ядра. В 1987 году в НИИЯФ МГУ было открыто явление конфигурационного расщепления ГДР, позволившее объяснить его большую ~ 10 МэВ ширину. Открытие № 342, авторы – сотрудники кафедры Общей Ядерной Физики физического факультета МГУ Б.С.Ишханов, И.М.Капитонова и В.Г.Шевченко и сотрудники НИИЯФ МГУ В.Г.Неудачин и Н.П.Юдин.

При исследовании особенностей проявления ГДР в области энергий до ~ 50 МэВ было установлено, что с увеличением энергии становится возможным испускание облучаемым γ -квантами ядром нескольких нуклонов и их комбинаций. С наибольшей вероятностью ядро испускает 1 нуклон, с меньшей вероятностью – 2 нуклона, с еще меньшей вероятностью 3 нуклона и т.д. Это обстоятельство вместе с соотношением энергетических порогов соответствующих реакций определяет основные каналы распада ГДР – парциальные реакции. Они дают вклад в сечение полной реакции фотопоглощения $\sigma(\gamma, \text{abs}) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 1n1p) + \sigma(\gamma, 2n) + \sigma(\gamma, 3n) + \sigma(\gamma, 1p) + \sigma(\gamma, 2p) + \sigma(\gamma, 1t) + \sigma(\gamma, 1d) + \sigma(\gamma, 1\alpha) + \dots + (\gamma, f)$. Сечения парциальных реакций также имеют форму резонансов,

которые располагаются в различных энергетических областях, поскольку их пороги сдвинуты относительно максимума в сечении реакции полного фотопоглощения, определяемого максимумом сечения основной парциальной реакции $(\gamma, 1n)$. Сечения таких реакций широко востребованы в фундаментальных исследованиях в таких областях, как собственно ядерная физика и астрофизика, а также во многих прикладных областях от неразрушающего контроля до мониторингирования встречных пучков современных коллайдеров.

Способы определения сечений парциальных реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$ и др.) в экспериментах на пучках тормозных γ -квантов и квазимоноэнергетических фотонов существенно различаются. В экспериментах первого типа сначала определяется сечение так называемой реакции выхода, например, нейтронов, $\sigma(\gamma, Xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots$, вклад в которую дают частицы, образующиеся во всех доступных по энергии процессах. В это сечение затем вносится поправка, рассчитываемая по статистической теории ядерных реакций, позволяющая определять сечения парциальных реакций. В экспериментах на пучках позитронов с использованием специально разработанного метода разделения нейтронов по множественности сначала определяются сечения парциальных реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$, из которых затем комбинируются сечения полных реакций (γ, abs) и (γ, Xn) . Данные по сечениям парциальных реакций получены в экспериментах этого типа, главным образом, в Ливерморе и Сакле.

Из сказанного ясно, что экспериментальные данные, полученные в разных экспериментах, могут существенно различаться, поскольку существенно различаются и способы получения пучков налетающих фотонов и методы определения информации о сечениях парциальных реакций. В этой связи основные характеристики ГДР были определены со значительными систематическими погрешностями. Существенные расхождения между данными из разных экспериментов анализировались специалистами, которые пытались определить их причины и найти способы устранения их влияния на качество результатов. Довольно долго такие попытки не носили системного характера, а рекомендации отдельных специалистов противоречили друг другу. В 90-х годах XX столетия после создания международной базы данных по ядерным реакциям в Центре Данных Фотоядерных Экспериментов (ЦДФЭ) НИИЯФ МГУ – участнике Сети Центров Ядерных Данных (СЦЯД, 13 Центров из 9 стран (Австрия, Венгрия, Китай, Корея, Россия, США, Украина, Франция, Япония)) Международного Агентства по Атомной Энергии (МАГАТЭ), были проведены системные исследования таких расхождений.

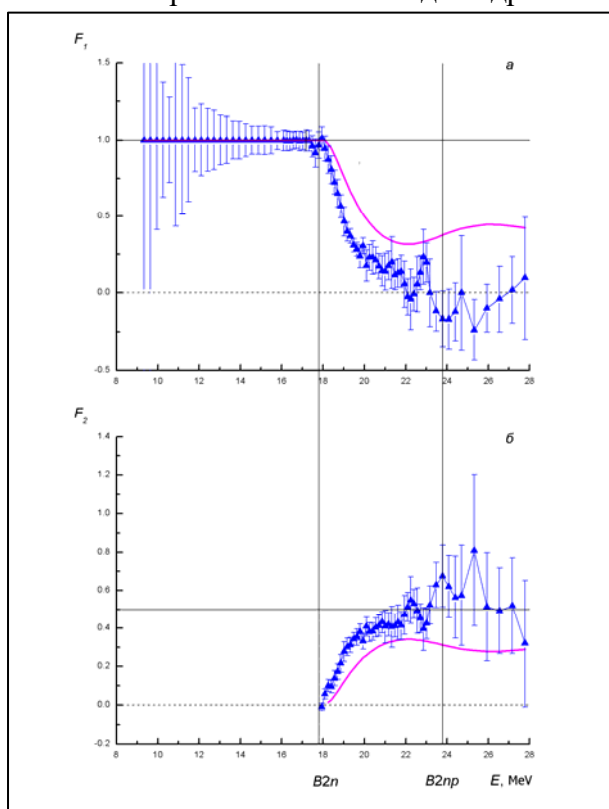


Было установлено следующее. Сечения реакции выхода $\sigma(\gamma, Xn)$, полученные в разных экспериментах, за исключением данных Ливермора, согласуются между собой. При этом данные Ливермора имеют абсолютные величины в среднем на $\sim 10\%$ меньшие. В то же время сечения парциальных реакций, абсолютное большинство которых было получено в Ливерморе и Сакле, отличаются на величины $\sim 100\%$. Эти расхождения очевидно являются

систематическими. Так, для 19 ядер исследованных в обеих лабораториях, сечения реакции $(\gamma, 1n)$ имеют существенно большие величины в Сакле, а реакции $(\gamma, 2n)$ – в Ливерморе. Это означает, что данные, полученные в одной или в обеих из упомянутых лабораторий, содержат систематические погрешности, обусловленные недостатками использованного метода разделения нейтронов по множественности. На повестку дня была поставлена задача нахождения объективных критериев достоверности данных по сечениям парциальных реакций, не зависящих от способа их определения.

В определенной степени она была решена в ЦДФЭ НИИЯФ МГУ. В результате анализа многих соотношений между сечениями полных и парциальных реакций в 2010 году были предложены простые наглядные объективные физические критерии достоверности обсуждаемых данных, позволяющие делать заключения о систематических погрешностях в экспериментальных сечениях реакций - отношения $F_1 = \sigma(\gamma, in) / \sigma(\gamma, Xn) = \sigma(\gamma, in) / [\sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots]$. По физическому смыслу определения положительные отношения F_1 не могут превышать значения 1.00, F_2 - значения 0.50, F_3 - 0.33 и т.д. Превышение предельных значений отношениями $F_i^{\text{эксп}}$ означает, что в конкретном эксперименте разделение нейтронов между каналами с различной множественностью было выполнено некорректно, а, следовательно, полученные сечения парциальных реакций являются физически недостоверными. Был предложен экспериментально-теоретический метод оценки сечений реакций, свободных от систематических погрешностей и удовлетворяющих физическим критериям достоверности. Суть нового метода весьма проста. Экспериментальное сечение реакции выхода $\sigma(\gamma, Xn)$ данные по которому отличаются не слишком сильно ($\sim 10\%$), разделяются на вклады парциальных реакций с использованием отношений $F_i^{\text{теор}}$, рассчитываемых в рамках комбинированной модели фотоядерных реакций, развитой в НИИЯФ МГУ и хорошо апробированной на описании полных сечений реакций - $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, in) = F_i^{\text{теор}} \times \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, Xn)$. Такой метод оценки означает, что соотношения между оцененными сечениями $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, in)$ устанавливаются соответствующими объективным физическим критериям достоверности данных на основании положений модели ($F_i^{\text{теор}}$), а их соответствующая сумма $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, Xn)$ совпадает с $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, Xn)$.

Физические критерии достоверности и метод оценки были использованы для получения новых оцененных данных по сечениям парциальных реакций для ~ 50 ядер. Работы были поддержаны грантом РФФИ № 13-02-00124 и Координационным исследовательским Проектом № F41032 (исследовательский контракт № 20501) МАГАТЭ. Было установлено, что во многих случаях экспериментальные данные, полученные в Ливерморе и Сакле, предложенным критериям достоверности данных не соответствуют, что наглядно иллюстрируют отрицательные отношения $F_1^{\text{эксп}}$ и отношения $F_2^{\text{эксп}} > 0.50$ в области энергий $\sim 23-27$ МэВ для ядра ^{63}Cu .



На основании анализа расхождений между экспериментальными и оцененными сечениями реакций было установлено, что основной причиной расхождений являются недостатки использованного в этих лабораториях метода определения множественности нейтронов по их измеряемой энергии. Энергетические спектры нейтронов, образующихся в реакциях $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$, близки, вследствие чего, распределение нейтронов между каналами с различной множественностью оказывается недостоверным. Более того, использованные методы определения сечений парциальных фотонейтронных реакций не учитывали влияния на эти сечения и протонных реакций. Так, например, соотношения между энергией, которая уносится единственным нейтроном из реакции $(\gamma, 1n)$ или распределяется между двумя нуклонами из реакций $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 1n1p)$ оказываются

очень сложными и далеко не прямо связанными с множественностью нуклонов. Энергия возбужденного ядра делится приблизительно одинаково между нейтроном и протоном из реакции $(\gamma, 1n1p)$ или между двумя нейтронами из реакции $(\gamma, 2n)$, но при этом множественность нейтрона из первой из них равна 1, а из второй – 2. В результате выполнения Проекта МАГАТЭ, в котором приняли участие специалисты из Австрии, Китая, Кореи, России, Румынии, США, Франции и Японии, была существенно обновлена и дополнена электронная библиотека оцененных фотоядерных данных МАГАТЭ, широко используемая во всем мире. В настоящее время она включает в себя оцененные сечения различных полных и парциальных фотонейтронных реакций для ~ 250 ядер.

Предложенный в НИИЯФ МГУ экспериментально-теоретический метод оценки сечений фотоядерных реакций позволил получить большое количество новых данных, соответствующих физическим критериям достоверности, существенно отличающихся от экспериментальных данных, полученных ранее с помощью метода разделения нейтронов по множественности. Весьма актуальной задачей стало сравнение этих оцененных данных с результатами экспериментов, выполненных с помощью новых методов идентификации продуктов реакций. С этой целью в НИИЯФ МГУ был разработан активационный метод определения на пучке тормозного γ -излучения выходов многонуклонных фотоядерных реакций. Метод сочетает преимущество высокой интенсивности пучка фотонов с однозначностью процедуры идентификации парциальных реакций не по характеристикам вылетающих нейтронов (которые, как отмечалось выше, для реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$, могут определяться со значительными систематическими погрешностями), а по характеристикам конечных ядер, разных в разных реакциях. Было установлено, что результаты экспериментов на пучке тормозного γ -излучения современного электронного ускорителя нового поколения - разрезного микротрона, разработанного в НИИЯФ, для нескольких ядер существенно расходятся с результатами предыдущих экспериментов, но оказываются близки к результатам выполненных оценок. Аналогичный вывод был сделан и на основании сравнения оцененных данных для нескольких ядер с результатами аналогичных активационных экспериментов, выполненных индийскими и корейскими учеными на пучке тормозного γ -излучения линейного ускорителя электронов в Ускорительной лаборатории Пхохан (Корея).

Одной из причин значительных систематических погрешностей результатов экспериментов, выполненных ранее, является существенная зависимость от энергии эффективности регистрации одного, двух и трех нейтронов из реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$. В этой связи в рамках Договора о научном сотрудничестве между НИИЯФ МГУ и Университетом Конан (Япония) на пучке квазимоноэнергетических фотонов, полученных при обратном комптоновском рассеянии релятивистских электронов, на установке NewSUBARU, реализован метод детектирования нейтронов с эффективностью, слабо зависящей от их энергии. Результаты, полученные для нескольких ядер, также существенно расходятся с результатами ранних экспериментов, но согласуются с результатами оценок, выполненных с использованием физических критериев достоверности данных.

Полученные к настоящему времени новые оцененные данные о сечениях фотоядерных реакций, удовлетворяющие физическим критериям достоверности, позволяют пересмотреть (уточнить) результаты оценок многих физических процессов, при проведении которых использовались полученные ранее экспериментальные данные. Они использованы для уточнения и обновления электронной библиотеки оцененных фотоядерных данных МАГАТЭ, широко используемой для фундаментальных и прикладных ядерно-физических исследований во всем мире, и включены в международную электронную базу данных по ядерным реакциям системы EXFOR. Она поддерживается Сетью Центров Ядерных Данных МАГАТЭ и включает в себя экспериментальные и оцененные данные по ядерным реакциям под действием фотонов, нейтронов, заряженных частиц и тяжелых ионов.

На сайтах ЦДФЭ НИИЯФ МГУ, Национального центра ядерных данных США и Секции ядерных данных МАГАТЭ электронная база данных по ядерным реакциям EXFOR вместе с некоторыми другими базами данных, содержащими современную информацию об атомных ядрах и процессах их радиоактивных превращений, функционирует в режиме открытого доступа. Сочетание возможностей огромных информационных массивов электронных баз данных и гибкого программного обеспечения открывает перед пользователями практически неограниченные возможности поиска данных по большому количеству параметров, зачастую позволяя, как отмечалось выше, устанавливать неизвестные ранее закономерности. По существу это делает современные электронные базы данных новыми и эффективными средствами научных исследований, получения новой научной информации и, в конечном счете, нового научного знания об объектах исследований. Такими объектами являются выходы и сечения ядерных реакций, энергетические и угловые распределения их продуктов, массы и энергии связи ядер, энергии отделения от ядер нуклонов и кластеров, спектры энергетических состояний ядер, их спины, четности, изоспины, зарядовые и массовые радиусы и плотности, данные о форме ядер, характеристики распадов нестабильных ядер.

Созданные базы данных широко используются студентами физического факультета МГУ и других вузов, изучающими физику атомного ядра в рамках курсов общей ядерной физики, так как предоставляют им доступ к современным массивам основных характеристик ядер и ядерных реакций, полученных мировым сообществом. С использованием баз ядерных данных сотрудниками кафедры Общей Ядерной Физики физического факультета и НИИЯФ МГУ изданы учебные пособия, которые широко используются при работе над дипломными и диссертационными работами.

Профессор В.В.Варламов
главный научный сотрудник НИИЯФ
доктор физико-математических наук.