



Во многом знании — новое знание!

Базы данных как метод исследования

В.В.Варламов, И.Н.Бобошин

«**В**о многой мудрости много печали, и умножающий познания умножает скорбь», — говорит Екклезиаст. «Много будешь знать, скоро состаришься», — подтверждает русская народная мудрость. Кроме известного гуманитарного смысла, эти высказывания несут свидетельства того, что человечество уже в давние времена сталкивалось с определенными трудностями при обработке больших количеств информации. Что же тогда говорить про времена нынешние!

В современном мире информация производится в огромных объемах со все большей скоростью. Согласно исследованиям, проведенным специалистами университета в Беркли [1], объемы созданной и сохраненной на различных носителях новой оригинальной информации во всем мире за 2002 г. составили 5 экзбайт ($5 \cdot 10^{18}$ байт), а количество информации, переданной по цифровым коммуникационным сетям, — 18 экзбайт. Чтобы масштаб этих цифр стал наглядным, укажем, что 5 экзбайт примерно соответствует количеству информации во всех высказываниях за всю историю человечества [1]. Указанные объемы удваиваются каждые три года, т.е. информа-



Владимир Васильевич Варламов, доктор физико-математических наук, профессор, руководитель Центра данных фотоядерных экспериментов Научно-исследовательского института ядерной физики им.Д.В.Скобелевца Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. Область научных интересов — физика ядра и ядерных процессов, оценка данных, создание средств управления базами данных.



Игорь Николаевич Бобошин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник того же института. Занимается изучением структуры атомного ядра, разработкой методов анализа информации.

ция растет в геометрической прогрессии. Дабы не умножать скорбей и избежать преждевременного старения, в настоящее время созданы и достигли значительного развития технологии упорядочения и концентрации, сжатия получаемой информации. Одним из таких средств, получившим большое распространение, стали базы данных. И здесь неожиданно обнаруживается параллель с общими зако-

номерностями развития научного знания.

Упорядочивая данные, минимизируя объемы

Историю научного знания можно описать как взаимодействие двух конкурирующих процессов. Первый из них — получение все новых и новых эмпирических фактов, а второй —

стремление сжать, сконцентрировать накопленные массивы данных, представить наибольшее число фактов самым лаконичным образом. Плодотворное противоречие между этими двумя сторонами научного познания движет его вперед, служит источником прогресса. Идеальной формой сжатия эмпирической информации следует признать аналитические формулы, которые описывают огромное многообразие результатов определенного типа. Так, например, Ньютон в одно уравнение закона всемирного тяготения «поместил» громадное количество результатов наблюдений, относящихся к взаимному движению масс. Важное свойство такого рода концентрированного представления информации, по сути представляющего собой базу данных (БД) в ее наивысшей форме — некую сверхбазу данных — то, что оно начинает обладать определенными предсказательными свойствами. Иными словами, в такой сверхбазе данных находятся результаты не только уже выполненных экспериментов, но и содержится весьма точная оценка результатов экспериментов еще не проведенных, «возможных», «будущих».

Однако природа устроена так, что далеко не все ее явления поддаются, по крайней мере сразу, аналитическому описанию. Иногда наилучшей формой научного знания оказывается именно БД как упорядоченное и концентрированное представление эмпирических фактов. Примером может служить всем известная Периодическая таблица химических элементов Д.И. Менделеева. Поразительно, но именно так: цент-

ральное, фундаментальное открытие в области химии есть не экспериментальный факт, не аналитическая формула, не система уравнений, а база данных! По существу, Периодическая таблица — это база данных химических элементов, последовательно отсортированных сначала по одному атрибуту — «валентности», а затем, внутри этой сортировки, по другому — «заряду». Она обладает мощной предсказательной силой: достаточно сказать, что с ее помощью были открыты несколько химических элементов с заранее определенными свойствами.

Базами данных мы называем коллекции данных о каком-либо предмете, созданные человеком или группой людей, вообще говоря, не имеющих непосредственного отношения к получению этих данных. Люди могут коллекционировать значки или монеты, а могут — информацию, разве нет? Такие коллекции могут быть не менее ценными, чем любые иные. Вспомним замечательную картотеку Шерлока Холмса, в которой нашлась и карточка ужасного профессора Мориарти: ведь это не что иное, как «БД по лондонской преступности». Шерлок Холмс не знал термина «база данных», но пользовался этим инструментом отменно.

Современные научные БД — большие и сложные коллекции данных, размещенные на электронных носителях. Они являются плодом труда профессионалов высокой квалификации, просматривающих огромное количество научных работ. Как правило, научные публикации содержат не только результаты исследований, но сопутствующую

информацию: обсуждения этих результатов, сравнения с уже имеющимися и с предсказаниями теории, объяснения разногласий, попытки сделать обобщения, выводы и т.д. Задача составителей БД — сделать содержательную «выжимку» результатов из этих публикаций, не упуская из виду все привходящие моменты, упорядочить их и поместить в БД, благодаря чему объем информации уменьшается, она концентрируется.

Безусловно, любая БД представляет собой лишь «склад готовой продукции». Однако в случае современных научных БД этот склад содержит огромное количество «продукции», разложенной по огромному количеству «полочек» и снабженной точными «этикетками». По складу на большой скорости перемещаются «вышколаченные курьеры», безошибочно выполняющие любое пожелание «клиента». И в некоторый момент количество упорядоченной информации начинает переходить в новое качество — согласно известному философскому тезису. Этим новым качеством становится возможность получения посредством БД нового научного знания благодаря предсказательности.

Для исследований в области ядерной физики все сказанное имеет особое значение. Для адекватного и точного описания всех свойств такого сложного физического объекта, каковым является атомное ядро, не существует единых, общепризнанных и бесспорных аналитических формул. Поэтому адекватной формой знания об этом объекте могут считаться именно соответствующие БД при условии их полноты и репрезентативности. Количество данных, получаемых и применяемых в современных ядерно-физических экспериментах и востребованных современными технологиями, огромно и с течением времени только возрастает, как наглядно показывает таблица 1.

В 60-е годы рост числа публикаций был обусловлен бур-

Таблица 1

Число публикаций во всем мире по теме «экспериментальное исследование ядерных реакций» в разное время в течение одного года

Год	1960	1965	1970	1980	1990	1995	1997	2000	2002
Количество	232	364	2383	2848	2528	2956	3092	3386	3490

ным развитием ядерной физики, теперь же он просто часть общего роста количества информации, характерного для постиндустриального общества. И этот рост таков, что без создания, поддержания и предоставления широкому кругу пользователей мощных БД, снабженных гибкими поисковыми системами, обуздать информационные потоки становится невозможно.

Паспорт ядра

Атомные ядра — это сложные физические системы, которые описываются очень большим количеством параметров, получаемых из различных экспериментов. Ядро представляет собой систему замысловатым образом взаимодействующих между собой частиц — протонов и нейтронов. Например, в самом легком ядре водорода — ${}^1\text{H}$ — имеется только один протон (нейтронов нет вовсе), а в ядре свинца с массовым числом 208 — ${}^{208}\text{Pb}$ — 82 протона и 126 нейтронов. Уже само количество таких частиц в ядрах (которых в настоящее время известно свыше 2500), а также массы, размеры, параметры формы — все это ядерные данные.

Одной из центральных проблем ядерной физики остается внутренняя структура атомного ядра. Около полувека тому назад была предложена так называемая оболочечная концепция строения ядра. Согласно ей протоны и нейтроны ядра не находятся в покое, а движутся внутри ядра по некоторым орбитам (которые были названы оболочками), подобно тому как планеты движутся по орбитам вокруг Солнца или электроны в атоме — вокруг ядра. На каждой орбите может находиться несколько протонов или нейтронов, но не более некоторого числа для каждой оболочки. По мере перехода от легких ядер ко все более тяжелым, со все большим числом протонов и нейтронов, оболочки заселяются протонами и нейтрона-

ми последовательно одна за другой от ближайших к центру ядра оболочек до самых удаленных. Изначально считалось, что на каждой орбите может находиться только целое число протонов или нейтронов. Однако со временем выяснилось, что реальные ядра устроены несколько сложнее, и дело можно представить себе так, что протоны и нейтроны какое-то время находятся на одной орбите, а какое-то — на другой, в то время как само ядро остается в неизменном состоянии. Если усреднить эти процессы по времени, то число протонов или нейтронов на оболочке может оказаться не целым, а дробным. Причина посещений нуклонами соседних орбит состоит в сильном взаимодействии между ближайшими друг к другу нуклонами. Поэтому важно точно знать реальные числа протонов и нейтронов на каждой орбите. Это позволяет более детально изучить силы взаимодействия между нуклонами.

Ядро, содержащее только полностью заполненные, т.е. не имеющие свободных мест оболочки ближе к центру, и абсолютно пустые оболочки вдали от него, обладает особыми свойствами — дополнительной стабильностью, большей пространственностью в природе, сферичностью формы и т.д. Ядра с такими свойствами были известны давно, но природа их особых свойств в «дооболочечную» эпоху была не ясна, поэтому они были названы «магическими» ядрами, а числа протонов или нейтронов в них — «магическими» числами.

Каждое ядро может находиться в огромном количестве энергетических состояний, из которых только одно — основное — может быть стабильным, а другие в течение некоторого времени переходят в основное состояние посредством испускания различных частиц и γ -квантов различных энергий. Про такие процессы принято говорить, что соответствующие состояния (или уровни) распадаются. Разнооб-

разные параметры состояний ядра или переходов между ними (привычные и понятные — энергия, время жизни или период полураспада, менее привычные и/или не совсем понятные большинству читателей — спин, четность, спектроскопический фактор, мультипольность, коэффициенты смешивания и ветвления и многие другие) — все это тоже ядерные данные.

Атомные ядра могут превращаться одно в другое под действием внутренних (такие процессы называются радиоактивными распадами) или внешних причин. В качестве внешних воздействий могут выступать столкновения с разнообразными налетающими на ядро-мишень частицами (такие превращения называются ядерными реакциями). Огромное количество характеристик подобных процессов (вероятности и типы распадов, выходы продуктов, сечения реакции, функции возбуждения, энергетические спектры, угловые распределения частиц и т.п.) также составляют информационное пространство ядерных данных.

Как устроены базы ядерных данных

Базы данных, описывающие свойства атомных ядер, имеют значительный объем и сложное строение. В силу ряда исторических причин (курс на нераспространение ядерного оружия требовал дать прямой доступ «неядерным» государствам к научной информации по ядерной физике) создание актуальных и полных БД в области ядерной физики началось очень давно и носило планомерный, долговременный и глобальный характер. Этому способствовал тот факт, что оно проводилось под эгидой Международного агентства по атомной энергии. В настоящее время свыше 20 центров и групп из разных стран — Австрии, Китая, Кореи, России, Словакии, США, Украины, Фран-

ции, Швеции, Японии и др. — объединены в Сеть центров ядерных данных МАГАТЭ [5]. В итоге к моменту, когда во всем мире начался информационный бум и стали развиваться технологии БД, ядерная физика оказалась едва ли не самой передовой и подготовленной в этом отношении областью знаний.

В качестве примеров современных массивов ядерных данных можно привести следующие два. Массив экспериментальных и оцененных (проанализированных специалистами) данных по структуре атомных ядер ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File) содержит всю опубликованную в настоящее время информацию обо всех известных стабильных и радиоактивных ядрах, их массах, энергетических уровнях, переходах между ними, радиоактивных распадах (энергии, времена жизни, интенсивности, спины, четности и т.д.). Полный объем массива составляет около 150 Мб.

Массив данных по ядерным реакциям международной системы EXFOR (EXchange FORmat — обменный формат) включает в себя огромное количество

во разнообразной информации (выходы, сечения, функции возбуждения, энергетические, угловые, массовые, зарядовые и другие распределения продуктов и др.) о реакциях под действием фотонов, нейтронов, разнообразных заряженных частиц и тяжелых ионов. Полный объем массива составляет свыше 500 Мб (более 100 тыс. работ и 1 млн наборов данных).

Подобные БД тем эффективнее, чем больше данных содержат и чем большую гибкость имеют их поисковые системы, т.е. чем по большему количеству признаков и их сочетаний может производиться поиск. Ниже приводится (рис.1) поисковая форма реляционной* БД по структуре атомных ядер (http://cdfе.sinp.msu.ru/services/ensdfr.html) системы Relational ENSDF, созданной в Центре данных фотоядерных экспериментов Института ядерной физики МГУ. Это своеобразная информационная «матрешка», последовательно вскрывая которую, пользователь

* В реляционной БД данные организованы в большое количество столбцов и строк, между которыми могут быть установлены самые произвольные отношения — реляции.

формирует свое запросное предписание относительно любых данных, описывающих ядро в целом, его энергетические уровни и всевозможные переходы между ними. Еще одним примером может служить созданная в этой же лаборатории поисковая система по ядерным реакциям системы EXFOR (http://cdfе.sinp.msu.ru/exfor/index.php). В ней поиск возможен по всем реквизитам, полностью описывающим ядерную реакцию: ядро-мишень, налетающая частица, вылетающая частица, ядро-продукт, характеристики реакции, область энергий налетающих частиц и углов вылета частиц-продуктов.

Возможность обработки в полных реляционных БД практически любого комбинированного запроса позволяет во многих случаях получить информацию, которая хотя и была известна (опубликована), однако другими способами практически не могла быть получена. Точнее, в принципе могла бы, но во многих случаях это потребовало бы времени, «несовместимого с человеческой жизнью». Так, ни в одном печатном каталоге, системном указателе, рубрика-

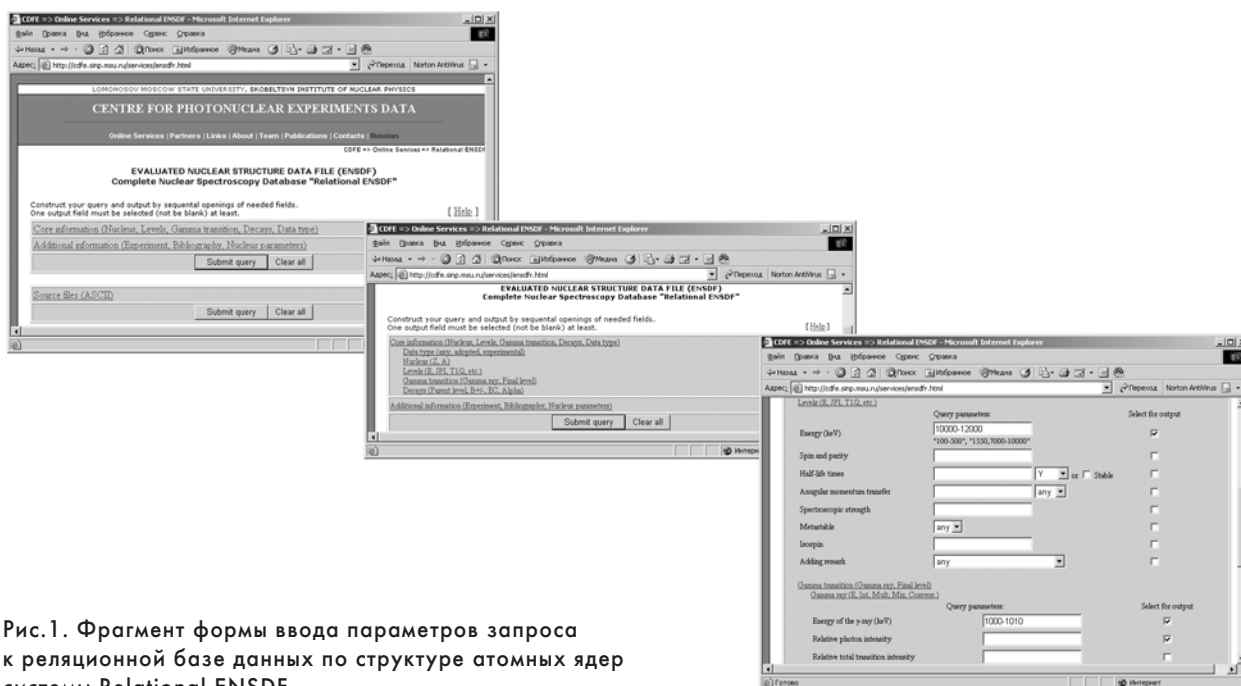


Рис. 1. Фрагмент формы ввода параметров запроса к реляционной базе данных по структуре атомных ядер системы Relational ENSDF.

Subvert	First Author	Reference (+ NSR)	Target Nucleus	Reaction	Final Nucleus	Quantity	Field of Measurement
00783221	J Benliloue+	JNP/A.693.513.2001	1-H-1	(79-AU-197F)	27-CO-60	FIS.SIG	GEV 157.6 157.6
00933507	T ENQVIST+	JNP/A.696.491.2001	1-H-1	(82-FB-208.X)	27-CO-60	FIS.SIG	GEV 208 208
01228003	B Fernandez-Dominguez+	JNP/A.747.227.2005	1-H-1	(82-FB-208.F)*	ELEM/MASS	.SIG	MEV 497 497
00921003	T Enqvist+	JNP/A.701.435.2002	1-H-2	(82-FB-208.F)	ELEM/MASS	IND.SIG	MEV 208000 208000
A0350082	E BOZEM+	JNP/A.451.171.1986	22-Ti-50	(6-C-12,N+P)	27-CO-60	.SIG	MEV 21.36 52.58
A0477020	P KOZMA+	JGZ/B.40.29.1920	25-MN-55	(6-C-12,X)	27-CO-60-0	IND.SIG	GEV 43.8 43.8
A0389005	M DE LA VEGA VEDOYA+	JLEN.120.49.88	26-FE-0	(A,X)	27-CO-60	CUM.SIG	MEV 9.3 83.3
B0172011	J JASTRZEBSKI+	JPR/C.19.724.79	26-FE-56	(3-LI-6,2P)	27-CO-60-0	1-M+.SIG	MEV 15.4 95.1
A0510339	V N LEVKOVSKI	B.LEVKOVSKI.01	26-FE-57	(A,P)	27-CO-60	.SIG	MEV 7.3 34.1
A0510345	V N LEVKOVSKI	B.LEVKOVSKI.01	26-FE-58	(A,N+P)	27-CO-60	.SIG	MEV 23.7 45.9
10543005	R.R SPENCER+	JNSE.61.346.7611	27-CO-52	(N,G)	27-CO-60	.SIG_AV	KEV 85 1000

Рис.2. Небольшой фрагмент результата обработки в БД EXFOR следующего запроса: Найти все реакции, в которых в качестве конечного ядра образуется изотоп ⁶⁰Co.

Source	Nucleus	Level energy	Spin-parity	Half-life	Reference	Photon energy	Photon intensity (rel.)
⊗	7-N-15	6323.78 (2)	3/2-	0.146 FS (8)	1991AJ01	1024.92 (2)	0.05
⊗	7-N-15	8312.62 (3)	1/2+	1.2 FS (8)	1991AJ01	1011.75 (4)	5.6 (9)
⊗	7-N-15	8571.40 (12)	3/2+	0.5 FS (5)	1991AJ01	1004.3 (10)	4.6
⊗	10-NB-21	5549 (1)	3/2+	28 FS (9)	1990EN08	1026	41 (7)
⊗	12-MG-27	5172 (1)	(3/2,5/2)+	10 FS	1990EN08	1022.1 (11)	11.1 (23)
⊗	18-AR-35	5572.71 (17)	3/2+			1044.49	2.5 (8)
⊗	27-CO-55	5172.55 (15)	1/2-	7 FS (+7-3)		1008.4 (4)	18 (4)
⊗	38-SR-87	5091.06 (4)	1/2,3/2			1034.63 (4)	67 (10)
⊗	38-SR-87	5673.08 (6)	1/2,3/2			1028.63 (19)	13 (3)

Рис.3. Результат обработки в БД Relational ENSDF комплексного запроса. Требовалось найти ядра, уровни которых с энергией в области 5000—10 000 кэВ: имеют определенные значения спина (Spin-parity) — 1/2, 3/2 или 5/2; распадаются с испусканием γ -квантов с определенной энергией (Photon energy) в области от 1000 до 1050 кэВ. При этом требовалось указать сами ядра, энергии, спины и четности, времена жизни найденных уровней, энергии и интенсивности испускаемых этими уровнями фотонов, а также привести ссылки на печатные источники, в которых найденные при поиске данные были опубликованы.

торе, атласе не предусмотрен поиск данных для реакций, в результате которых образуются фиксированные конечные ядра. Для ядра-мишени и налетающих частиц такой поиск предусмотрен везде, для вылетающих частиц — кое-где, а для конечного ядра реакции — нигде! Между тем информация о том, в каких

именно реакциях образуется определенный элемент (скажем, ядро ⁶⁰Co, радиоактивное излучение которого может создавать, например, помехи регистрирующей аппаратуре) иногда представляет огромный интерес. На рис.2 показан результат такого поиска в БД, занявшего считанные секунды.

Второй пример (рис.3) относится к многочисленным задачам типа активационного анализа — поиска разнообразных комбинаций энергий возбуждения уровней ядер и энергий γ -квантов, испускаемых при распаде этих уровней. Количество таких комбинаций, которые могут быть использованы с различными целями, практически бесконечно, и получить такие данные в полном объеме без технологий БД фактически невозможно.

От известного к новому

Пока в наших примерах результатом поиска в БД становились данные, уже содержащиеся в этих БД. Однако во многих случаях относительно простая обработка результатов поиска порождает принципиально новую физическую информацию, которая до выполнения обработки таких запросов в используемых базах данных отсутствовала (по крайней мере, в явном виде).

Развитые БД и гибкие поисковые системы позволяют анализировать всю совокупность данных. Для получения новых данных (знаний) с единых позиций используются:

- выявление систематических закономерностей на основе совместного анализа результатов многих экспериментов;
- оценка результатов экспериментов, которые по тем или иным причинам не были (иногда не могут быть в принципе!) проведены, например, путем решения определенных систем линейных уравнений (неизвестные результаты входят в них вместе с некоторыми известными) и т.д.

Одним из примеров может служить исследование явления конфигурационного расщепления гигантского дипольного резонанса. Это явление было открыто теоретически в Институте ядерной физики МГУ несколько

лет назад (№ регистрации 342). Оно возникает в результате наличия двух различных вариантов взаимодействия с атомными ядрами налетающих γ -квантов, «разбивающих» ядро. В одном из них во взаимодействии участвуют нуклоны, расположенные бо-

лее глубоко относительно поверхности ядра, в другом — менее глубоко. Иными словами, в первом случае задействованы нуклоны, расположенные на более низких орбитах (подоболочках), в другом — на более высоких. Эти процессы происходят

при различных энергиях налетающих фотонов, в результате чего широкий и мощный резонанс в сечении реакции (т.е. максимум вероятности поглощения фотонов ядром при определенных энергиях фотонов) как бы разбивается на два резонанса при разных энергиях, что выражается в заметном увеличении его ширины, регистрируемой экспериментально. Схему такого эффекта иллюстрирует рис.4 на примере фоторасщепления изотопов лития ${}^6\text{Li}$.

Всякая теория, как известно, должна подтверждаться экспериментом. Но экспериментальное подтверждение этого предсказанного теоретически эффекта наталкивается на огромные сложности. Как видно из рис.5, для надежного разделения соответствующих групп уровней в самом общем случае необходимо знание того, на какие именно конечные уровни распадаются конкретные состояния обеих групп. Это требует одновременного изучения угловых распределений и энергетических спектров вылетающих фотопротонов и фотонейтронов, проведения сложнейших измерений в режиме многих совпадений, поскольку для многих ядер, в особенности для легких, фоторасщепление ядер происходит в многочастичных реакциях.

Однако для многих ядер, как, например, для упомянутых выше изотопов лития, детальное исследование всех параметров конфигурационного расщепления доступно на основе использования всего лишь возможностей современной БД. В случае фоторасщепления изотопов лития две искомые компоненты конфигурационного расщепления — высоко- и низкоэнергетичная — весьма существенно различаются. При переходах одной группы «внутренние части» ядер, представляющие из себя α -частицы (прочно связанные 2 протона и 2 нейтрона), не затрагиваются и в явном виде присутствуют среди продуктов реакций. При переходах другой

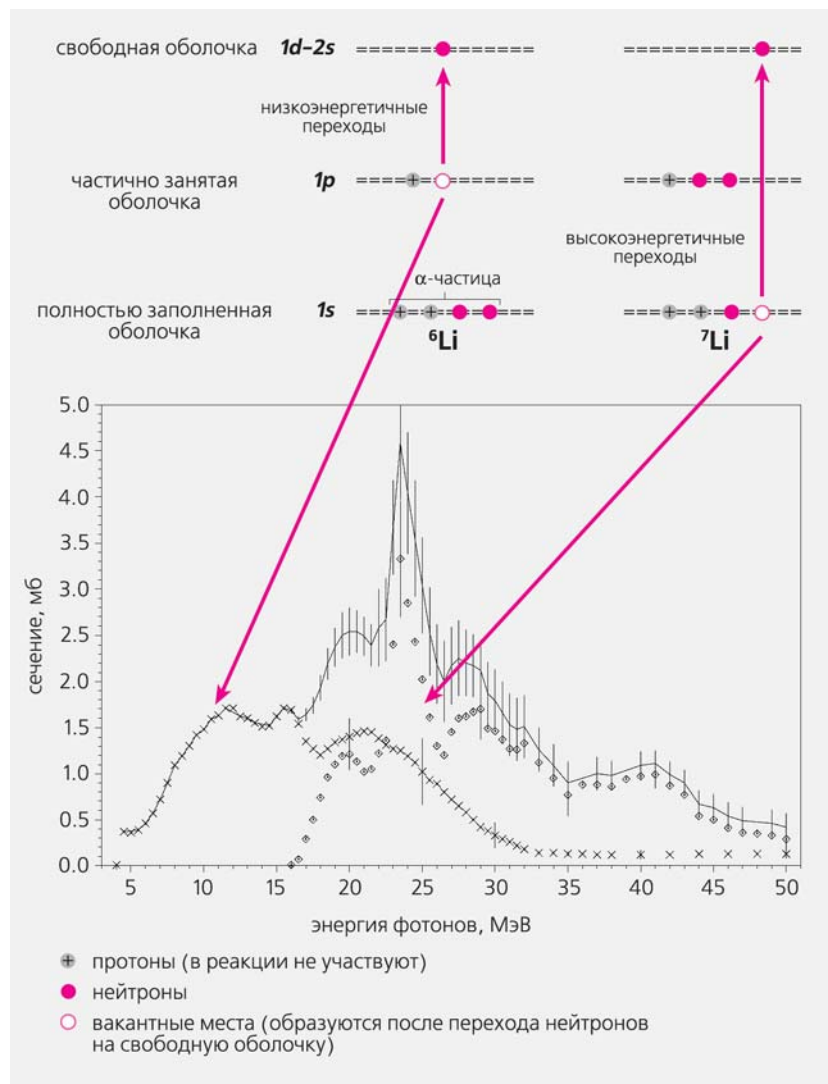


Рис.4. Конфигурационное расщепление гигантского дипольного резонанса на примере изотопов лития: два типа переходов в ядрах ${}^6,{}^7\text{Li}$. Схема расщепления ядер лития в реакции вылета нейтронов (при низкоэнергетичных переходах α -частица — два протона и два нейтрона на оболочке $1s$ — не затрагивается и присутствует среди продуктов реакции; при высокоэнергетичных переходах α -частица разрушается, и среди продуктов реакции ее нет) (а). Зависимость вероятности поглощения фотона (сечения реакции) от энергии (б). \oplus — значения сечений, регистрируемые экспериментально, \times — сечения для низкоэнергетичного перехода, \diamond — сечения для высокоэнергетичного перехода. Видны два гигантских резонанса, соответствующие двум типам переходов и расположенные при существенно разных энергиях налетающих фотонов.



Рис.5. Две группы реакций фоторасщепления двух изотопов лития по отношению к присутствию среди продуктов α -частицы (ядра ${}^4\text{He}$).

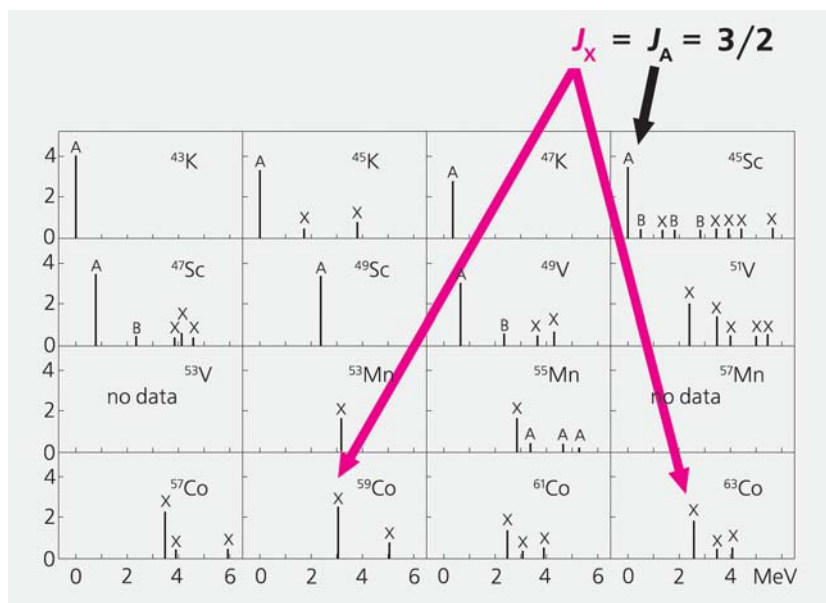


Рис.6. Определение неизвестных значений спинов ядерных состояний на основании одинакового поведения характеристик состояния. Показаны 16 распределений спектроскопической силы S ($l = 2$, для реакций срыва протона) по состояниям конечных ядер: А – состояние с $J = 3/2$, В – с $J = 5/2$, X – с неизвестным J . Поскольку во всех распределениях состояния с наибольшей S расположены при наименьшей энергии возбуждения, естественно считать, что все они имеют одно и то же значение спина.

группы эти внутренние α -частицы разрушаются. Из сказанного следует очевидный алгоритм исследования путем запроса к БД. Необходимо выбрать все известные данные по сечениям фотоядерных реакций на обоих изотопах лития и разложить их по двум группам (рис.5), в одной из которых α -частица имеется среди продуктов реакций, а в другой отсутствует [6]. Результаты такого «виртуального» исследования позволили впервые на основании экспериментальных данных определить основные параметры обеих компонент конфигурационного расщепления и тем самым подтвердить открытое ранее явление.

Таким же способом на основе результатов обработки запросов к БД по ядерной спектроскопии ENSDF могут быть получены [7] новые данные о параметрах ядерных состояний. В качестве примера проанализируем с помощью аппарата БД результаты экспериментов по изучению реакций срыва и подхвата нуклонов. В ходе этих реакций частица – по сути, маленькое ядро, состоящее из небольшого числа нуклонов – ускоряется в экспериментальной установке и пролетает вблизи исследуемого «большого» ядра. В этот момент либо большое ядро срывает нуклон с пролетающей частицы и присоединяет его к себе, либо пролетающая частица подхватывает нуклон – отнимает его у исследуемого ядра, присоединяет к себе и уносит вдалеке. Отсюда и названия реакций: срыв и подхват.

Важными характеристиками реакции являются величина S – так называемая спектроскопическая сила, дающая представление о вероятности образования в результате реакции того или иного конечного ядерного состояния, и спин J этого конечного состояния (напрямую в таких экспериментах не измеряется, может быть известен или неизвестен). Оказывается, что если просто выбрать из БД по

ядерной спектроскопии данные о величинах S для разных энергий состояний конечного ядра, причем таких, которые соответствуют передаче в ходе реакции нуклонов с одной и той же величиной l вращательного (так называемого орбитального) момента, то относительно спинов/конечных состояний могут быть сделаны вполне определенные выводы. Из приведенного на рис.6 примера для данных по реакции срыва протонов очевидно, что возбужденные состояния всех 16 ядер от ^{43}K до ^{63}Co имеют характерные совпадающие особенности: состояние с наибольшим S располагается при наименьшей энергии. Известные значения спинов таких состояний равны (в данном случае) $J_A = 3/2$, и есть все основания предполагать, что неизвестные спины также должны быть равны $J_x = J_A = 3/2$ — экспериментальные распределения альтернативы не предоставляют. Простейший анализ подобных распределений позволяет предсказать значения спинов многих состояний (табл.2). Одно из них было впоследствии подтверждено результатами сложных специальных экспериментов с поляризованными частицами. Эти предсказания свойств ядерных уровней аналогичны предсказаниям свойств химических

элементов на основе Периодической таблицы.

В поисках магических ядер

Эксперименты по изучению реакций срыва и подхвата нуклонов помогают определять внутреннее строение ядер. Важно подчеркнуть, что это два совершенно разных вида экспериментов, и по результатам одного из них (подхвата) определяют число нуклонов на внутриядерных орбитах, а по результатам другого (срыва) — число свободных мест на этих же орбитах. К сожалению, точность результатов и тех, и других экспериментов невысока, причем настолько, что данные, как правило, значительно расходятся, а иногда и противоречат друг другу. В итоге сказать что-либо достаточно конкретное о том, как расположены и заселены разные орбиты в определенных ядрах, часто попросту нельзя.

Задача точного определения чисел протонов и нейтронов или соответствующих вакансий на ядерных орбитах так и осталась бы неосуществимой мечтой физиков, если бы на помощь не пришел новый подход. Во-первых, данные экспериментов по изучению реакции как срыва,

так и подхвата были помещены в единую БД ENSDF, а во-вторых, выяснилось, что данные обоого типа можно связать между собой таким образом, что в результате их точность резко повышается, а противоречия между ними снимаются.

Идея связывания двух типов экспериментов чрезвычайно проста. Поясним ее на примере. Представьте себе, что у Вас имеется книжная полка с книгами. Вы не знаете точно, сколько на этой полке книжек, и Вы также не знаете точно, сколько на ней пустого места. Однако Вы точно знаете, какова вместимость этой полки, заложенная еще мастером, ее изготовившим. Сумма числа книжек и числа пустых мест, даже если они по отдельности точно не известны, и есть вместимость Вашей полки. Число книжек и число пустых мест связаны через эту сумму. Вместимость ядерных орбит известна из уравнений квантовой механики («заложена Мастером»), и данные экспериментов по срыву и подхвату оказываются связанными. Конвертировать эту связь в повышение точности данных о числе частиц (или книжек) — дело математической техники.

Привлечение же еще и имеющейся в этой же БД информации о спинах состояний образовавшихся ядер, собранной в результате анализа данных многих и многих экспериментов, и не только по срыву и подхвату нуклонов, позволяет еще более повысить их точность. В итоге удается весьма точно определять реальные числа нуклонов на орбитах и положения орбит в ядрах.

Таким образом, мы приходим к любопытному и весьма нетривиальному выводу. Связав воедино данные нескольких разных типов экспериментов из БД, относящиеся к одному и тому же ядру, мы получаем для этого ядра эмпирические данные, которые отдельно в каждом виде эксперимента не могли быть получены! В нашем институте такие работы ведутся на протяжении

Таблица 2

Данные об экспериментальных значениях спина ядерных состояний

Реакция	Исследуемое ядро	Энергия уровня, кэВ	Спин J (возможные значения из предыдущих экспериментов)	Спин J (предсказания с помощью БД)
$^{46}\text{Ti}(^3\text{He},d)$	^{47}V	2212	(1/2, 3/2)	3/2
$^{50}\text{Cr}(^3\text{He},d)$	^{51}Mn	3292	(5/2, 7/2)	5/2
$^{54}\text{Cr}(^3\text{He},d)$	^{55}Mn	3608	(5/2, 7/2)	5/2
$^{54}\text{Cr}(^3\text{He},d)$	^{55}Mn	2253	(1/2, 3/2)	3/2
$^{56}\text{Fe}(d,^3\text{He})$	^{55}Mn	2741	Неизвестен	3/2
$^{54}\text{Fe}(d,^3\text{He})$	^{53}Mn	3007	(3/2, 5/2)	3/2
$^{58}\text{Ni}(^3\text{He},\alpha)$	^{57}Co	3539	(3/2, 5/2)	3/2*
$^{60}\text{Ni}(^3\text{He},\alpha)$	^{59}Co	3162	(3/2, 5/2)	3/2
$^{62}\text{Ni}(^3\text{He},\alpha)$	^{61}Co	2559	(3/2, 5/2)	3/2
$^{64}\text{Ni}(^3\text{He},\alpha)$	^{63}Co	2660	(3/2, 5/2)	3/2

* Предсказанное значение спина $J = 3/2$ позднее было подтверждено результатами исследования реакции $^{58}\text{Ni} + \text{pol } d \rightarrow ^3\text{He} + ^{57}\text{Co}$.

нескольких лет. В результате были получены новые сведения о внутренней структуре нескольких десятков ядер. Впервые определены реальные числа нейтронов и протонов на внутриядерных орбитах для большого числа ядер. На основе этих данных получила объяснение непонятная ранее аномалия (отличие от предсказаний традиционной модели ядерных оболочек) в значениях спинов основных состояний изотопов ядра калия — ^{39,40,41,43,45,47}K. Она оказалась прямо связанной с тем, что некоторые реальные ядерные орбиты расположены друг относительно друга не совсем так, как предсказывается традиционной оболочечной моделью.

Одним из наиболее интересных результатов стали убедительные доказательства в пользу существования новых «магических» ядер.

Одно такое ядро — ⁹⁶Zr (цирконий с атомным номером 96) — состоит из 40 протонов и 56 нейтронов. Оказалось, что числа 40 и 56 составляют «магическую» пару, так как ядро ⁹⁶Zr обладает многими характерными свойствами «магических» ядер — сферической формой и определенной структурой возбужденных состояний. Нам удалось, используя описанный выше метод объединения различных данных, выяснить, что в этом ядре по непонятным пока причинам возникает новая целиком заполненная нейтронами оболочка (орбита, по которой движутся нейтроны внутри ядра) — а это, как мы упоминали, и приводит к возникновению особых свойств «магических» ядер. В дальнейшем стало понятно, что механизм возникновения «магичности» у этого ядра совершенно аналогичен тому, как это происходит у другого хорошо известного «классического» «магического» ядра — ⁴⁸Ca (кальция с атомным номером 48), состоящего из 20 протонов и 28 нейтронов. Найденный механизм состоит в том, что от обычной оболочки отщепляется

ее маленькая часть (подоболочка), отделяется достаточно далеко и становится новой самостоятельной оболочкой. При полном заселении этой новой образованной оболочки протонами или нейтронами получается новое «магическое» ядро.

Остается неясным, почему число 56 нейтронов составляет «магическую» пару только с числом 40 протонов? Это может быть свидетельством проявления некоего специфического взаимодействия между нейтронами и протонами ядра, заполняющими некоторые оболочки. Можно заметить, что названные два ядра — ⁹⁶Zr и ⁴⁸Ca — связывает еще одна связь, воистину удивительная! Так как 40 — это 20·2, а 56 — это 28·2, получается, что ядро ⁹⁶Zr как будто бы «состоит» из двух ядер ⁴⁸Ca. Когда мы впервые сказали слово «состоит», мы отдавали себе отчет, что используем, скорее, фигуру речи, отражающую арифметическое соотношение, и что этого не может быть в реальности, в буквальном смысле. Современная физическая теория не допускает подобного поведения — оно было бы столь же неестественным, как если бы две капли одинаковой жидкости слились в одну, но при этом оставались бы «жить» внутри этой капли отдельно друг от друга. Каково же было наше удивление, когда мы обнаружили свидетельства того, что, похоже, так оно и есть!

Дело в том, что оба ядра не являются стабильными ядрами, т.е. живут они хотя и очень долго, но все-таки не вечно. Они распадаются весьма редким образом — с испусканием сразу двух β-частиц (число распадов такого рода среди всех распадов ядер составляет приблизительно 1%). То, что ядро ⁹⁶Zr распадается таким же редким образом, что и его «половинка» ядро ⁴⁸Ca, уже само по себе — уникальное совпадение, достойное особого рассмотрения. Однако времена, за которые происходит распад обоих ядер, соотносятся так,

что можно говорить о настоящей мистике совпадений! Время полураспада ядра ⁹⁶Zr составляет 2,1·10¹⁹ лет, а время полураспада ⁴⁸Ca — 4,2·10¹⁹ лет: маленькое ядро живет ровно вдвое дольше большого! Поскольку вероятность распада ядра обратно пропорциональна времени полураспада, это означает, что вероятность распада большого ядра ровно вдвое больше такой же вероятности для маленького. Таким образом, дело обстоит так, как будто бы ядро ⁹⁶Zr реально состоит из двух ядер ⁴⁸Ca, каждое из которых распадается самостоятельно и независимо. Как такое может быть? Как две одинаковых капли, слившись в одну, все еще продолжают оставаться двумя каплями? И как это связано с особой внутренней структурой этих «капель», в данном случае — с известной «магичностью» ядра кальция-48 и вновь обнаруженной «магичностью» ядра циркония-96?

Напрасно читатель ждет от нас ответов и на эти вопросы. Их мы пока не знаем сами. Шаг за шагом на протяжении нашего повествования мы вели читателя от общеизвестных истин к установленным фактам, следуя путем открытий, умозаключений и догадок, пока не дошли с ним до вопросов, ответы на которые пока не найдены, до черты, за которой — область неизведанного, terra incognita. Именно вопросами, а не утверждениями мы полагаем достойным завершить рассказ о современных поисках в новой зарождающейся области исследований. Много веков назад, на заре человеческого знания, когда появились первые науки, когда люди делали первые шаги в изучении природы, о подобных областях незнаемого Плутарх писал так: «Ученые, в области географии, обозначают неизвестные им земли на самом краю карты, делая иногда надписи, что за ними — “безводные кишашие зверями песчаные пустыни”, или: “холодная Скифия”, не то: “Ледовитое море”».

Итак, использование современных баз данных как инструмента научного познания становится в один ряд с традиционными экспериментальными и теоретическими методами исследований окружающей нас действительности.

Может возникнуть вопрос: при чем тут, собственно говоря, базы данных, ведь они не содержат чего-то «нового», чего не было в первоначальных источниках — статьях, иных публикациях? Разве не может внима-

тельный и скрупулезный исследователь получить тот же результат, опираясь на оригинальные источники информации? В том-то и дело, что в современном мире — нет, не может, и чем дальше идет время, чем далее и далее развивается научный процесс, тем весомее это «нет». Количество данных, описывающих объекты современной науки, столь велико, что без применения современных информационных технологий принять их все к сведению

практически невозможно. А если уменьшается «количество» анализируемой информации, не возникает и «качество» — новое знание.

Первые удачные попытки постановки и решения научных задач с помощью современных БД могут составить основу нового научного направления — разработки методов содержательного анализа больших массивов информации — и получения на основе этого анализа нового знания. ■

Использованы результаты исследований, частично поддержанных грантом Президента РФ № НШ-1619.2003.2 для поддержки ведущих научных школ РФ, а также Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 99-07-90015, 03-07-90431, 04-02-16275).

Литература

1. <http://www.sims.berkeley.edu/research/projects/how-much-info-2003/>
2. Бобошин И.Н., Варламов В.В., Иванов Е.М. и др. Реляционные базы данных об атомных ядрах и ядерных реакциях в Интернет для исследований в области ядерной физики и смежных областях науки и техники // Труды Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет». Новороссийск, 24–29 сентября 2001 г. ISBN 5-211-04521-1. М., 2001. С.19–21.
3. Бобошин И.Н., Варламов В.В., Комаров С.Ю. и др. Электронная коллекция научных данных по физике атомных ядер и ядерных реакций ЦДФЭ НИИЯФ МГУ // Труды Четвертой Всероссийской научной конференции RCDL'2002 «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции», Дубна, 15–17 октября 2002 г. ISBN 5-9530-0007-03, Дубна, 2002. С.290–298.
4. Nuclear Structure References Data File, maintained by USA National Nuclear Data Center, URL: <http://www.nndc.bnl.gov/nndc/nsr/>
5. The Nuclear Data Centres Network. IAEA Nuclear Data Section / Ed. V.G.Pronyaev. INDC(NDS)-401, IAEA, Vienna, 1999.
6. Бобошин И.Н., Варламов А.В., Варламов В.В. и др. // Математическая морфология. Электронный математический и медико-биологический журнал. 2000. Т.3. Вып.3. URL: <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/N-6-html/VARLAMOV/varlamov.htm>
7. Boboshin I.N., Iskhhanov B.S., Varlamov V.V. New Data on Nuclear Subshells from the Analysis of the International Database on Nuclear Structure ENSDF // The International Conference «Nuclear Structure and Related Topics». Dubna, 2003. September 2–6. Contributions. ISBN 5-9530-0029-4, Dubna, 2003. P.20.