

Научная статья

УДК 372.852

DOI: 10.21209/2658-7114-2024-19-3-27-36

**Изучение ядерного магнитного резонанса
в инженерных и медицинских университетах**

Александр Анатольевич Машиньян¹, Нина Васильевна Кочергина²

¹*Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия*

²*Российский национальный исследовательский университет
им. Н. И. Пирогова, г. Москва, Россия*

¹mash404@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5937-9367>

²kachergina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6841-6369>

Актуальность данного исследования связана с широтой применения метода ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в современных инженерных и медицинских технологиях. Цель работы – адаптировать материал по методу ЯМР для студентов медицинских, инженерных и социально-гуманитарных специальностей и направлений обучения на разных уровнях изложения. Новизна исследования: выделены элементы знаний для объяснения метода ЯМР, обоснованы и определены три уровня объяснения ЯМР – классический и два квантовых (качественный и количественный). В работе использованы следующие методы: анализ и обобщение научной, учебной и методической литературы (по содержанию метода ЯМР, ядерной спектроскопии и магниторезонансной томографии, основных профессиональных образовательных программ специальностей и направлений обучения студентов бакалавриата и магистратуры инженерных и медицинских университетов); конструирование содержания учебного материала; проектирование способов и методов обучения. К конкретным результатам относится разработка трёх уровней изучения ЯМР. Классический уровень опирается на понятия вектора магнитной индукции кругового тока и его вращение вокруг магнитной индукции постоянного магнитного поля с определённой частотой, резонансного поглощения энергии радиосигнала ядром при совпадении их частот. Квантовые уровни изучения оперируют понятиями орбитального и магнитного спинов атомного ядра, гиромангнетного отношения, Ларморовой прецессии, расщепления уровней энергии атомного ядра, магнетона Бора, резонансного поглощения энергии ядром. Классический уровень рекомендован для студентов социально-гуманитарных направлений, не изучающих в чистом виде физику. Квантовый качественный уровень рекомендован для студентов специальностей и направлений подготовки медицинских и инженерных университетов, не изучающих квантовую физику как специальную дисциплину. Для студентов инженерных специальностей, связанных с квантовыми технологиями, и медицинских специальностей «Фармация» и «Стоматология», магистрантов, изучающих медицинскую технику, рекомендуется квантовый количественный уровень. Материал данного исследования имеет практическое значение в обучении студентов инженерных и медицинских вузов физическим основам современных методов и технологий.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, курс физики, уровни сложности, инженерный университет, медицинский университет, производственные технологии, медицинские технологии

Original article

Study of Nuclear Magnetic Resonance at Engineering and Medical Universities

Alexander A. Mashinyan¹, Nina V. Kochergina²

¹*National Research University "MAI", Moscow, Russia; ²Russian National Research University
them. N. I. Pirogova, Moscow, Russia*

¹mash404@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5937-9367>

²kachergina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6841-6369>

The relevance of this study is related to the breadth of the nuclear magnetic resonance (NMR) method application in modern engineering and medical technologies. The purpose of the work is to adapt the material using the NMR method for students of medical, engineering and socio-humanitarian specialties and areas of study at different levels of presentation. The novelty of the research is as follows: the elements of knowledge for explaining the NMR method are highlighted; three levels of NMR explanation are justified and defined – classical and two quantum (qualitative and quantitative). The following methods have been used in the work:

analysis and generalization of scientific, educational and methodological literature (on the content of the NMR method, nuclear spectroscopy and magnetic resonance imaging, the main professional educational programs of specialties and areas of study for undergraduate and graduate students of engineering and medical universities); designing the content of educational material; designing teaching methods and methods. Specific results include the development of three levels of NMR study. The classical level is based on the concepts of the magnetic induction vector of a circular current and its rotation around the magnetic induction of a constant magnetic field with a certain frequency, resonant absorption of radio signal energy by the core when their frequencies coincide. Quantum levels of study operate with the concepts of the orbital and magnetic spins of the atomic nucleus, the gyromagnetic ratio, Larmor precession, splitting of the energy levels of the atomic nucleus, the Bohr magnetone, and resonant absorption of energy by the nucleus. The classical level is recommended for students of social and humanitarian fields who do not study pure physics. The quantum qualitative level is recommended for students of specialties and fields of study at medical and engineering universities who do not study quantum physics as a special discipline. For students of engineering specialties related to quantum technologies, and medical specialties "Pharmacy" and "Dentistry", undergraduates studying medical technology, a quantum quantitative level is recommended. The material of this study is of practical importance in teaching students of engineering and medical universities the physical basics of modern methods and technologies.

Keywords: nuclear magnetic resonance, physics course, difficulty levels, engineering university, medical university, production technologies, medical technologies

Введение. Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) – один из основных методов исследования молекулярной структуры в инженерном и биомедицинском контекстах, основанный на анализе электромагнитного сигнала, идущего от ядер после резонансного поглощения ими радиоизлучения. ЯМР имеет огромное значение в связи с широким спектром современных практических применений, включая научные, инженерные и медицинские технологии. Будущим инженерам и врачам важно знать и понимать физические основы современных технологий их профессиональной деятельности. Однако не всегда очевидно, на каком уровне и какими методами продуктивнее для студентов изучать вопросы ЯМР в конкретном университете. **Актуальность** данного исследования состоит в рассмотрении физических основ ЯМР на разных уровнях сложности, а также технических и технологических приложений в курсах физики для студентов разных специальностей инженерных и медицинских вузов.

Новизна исследования состоит в обосновании и выделении уровней сложности содержания вариативного модуля изучения ЯМР, а именно: двух уровней классического и квантового описания с использованием качественного и количественного подходов.

ЯМР как универсальный метод изучения молекул позволяет не только определить химическую формулу неизвестных соединений, но и установить структуру органических соединений, процент чистоты вещества в составе сложных смесей. Технические и технологические применения ЯМР включают то-

мографию и материаловедение, ядерно-магнитный резонанс (каротаж) и геофизические исследования (гироскопы), а также сверхчувствительную магнитометрию.

Принимая во внимание важность отображения в курсах физики университетов современных разделов физики, в нашем исследовании поставлена цель – *разработать* вариативное содержание учебного модуля ЯМР для изучения на разных уровнях сложности студентами инженерных и медицинских университетов. Для реализации этой цели поставлены **задачи**:

- 1) проанализировать научную и методическую литературу по интерпретации ЯМР;
- 2) проанализировать и обобщить технологии применения ЯМР в науке, производстве и медицине;
- 3) разработать разные уровни содержания учебного модуля ЯМР по критериям: квантовый – классический, качественный – количественный;
- 4) на основе анализа программ и курсов физики для разных специальностей и направлений подготовки студентов в медицинских и инженерных вузах рекомендовать варианты уровней изучения содержания модуля ЯМР с учётом целей обучения.

Обзор литературы. Ядерный магнитный резонанс – резонансное поглощение электромагнитной волны системой атомных ядер, находящихся в постоянном магнитном поле. ЯМР был открыт Э. М. Перселлом (1945) и независимо от него Ф. Блохом (1946), которые наблюдали сигнал магнитного резонанса на протонах. В 1944 г. в Советском Союзе Е. Завойский открыл явление

электронно-позитронного резонанса (ЭПР). История развития ЯМР в СССР и России подробно рассмотрена в работе А. Кессениха [1].

За научные открытия в области ЯМР присуждены четыре нобелевские премии. Ф. Блох и Э. Перселл получили нобелевскую премию по физике за открытие ЯМР (1952). Р. Эрнсту была присуждена нобелевская премия по химии за развитие методов многомерной ЯМР-спектроскопии (1991), а К. Вютриху – за разработку методов определения трёхмерной структуры белков в растворе (2002). П. Лотербур и П. Мансфилд получили нобелевскую премию по медицине за изобретение ЯМР-томографии (2003).

В настоящее время явление ЯМР изучается в курсах физики и химии студентами разных специальностей университетов. Можно утверждать, что особое место среди них занимают специальности, связанные с обучением будущих учёных-физиков и учёных-химиков, инженеров и врачей. Если учёные должны усвоить ЯМР как современный метод научных исследований, то в инженерных и медицинских вузах ЯМР важен как основа современных технологий производственной деятельности и медицины.

Ядерный магнитный резонанс является окончательно сформированным физико-химическим методом с довольно продолжительной историей становления. По мере его развития были открыты важные вехи его применения, венцом которых стало изобретение ЯМР-спектроскопии, дающей подробную информацию о структуре, динамике, взаимодействиях и химическом окружении молекул. В научных работах Ю. Я. Устынюка, Г. П. Синявского с соавторами [2; 3]¹ ЯМР-спектроскопия рассматривается как метод исследования структуры и динамических превращений молекул, межмолекулярных взаимодействий, механизмов химических реакций и количественного анализа веществ. Авторы изложили теоретические основы и типы спектроскопии ЯМР, структуру и особенности ЯМР-спектров конкретных веществ.

В монографии П. А. Куприянова с соавторами [4] рассмотрены способы установления фактического содержания основных резонирующих изотопов в исследуемом образце, определения состава примесей, их качественный и количественный анализ. Для

¹ Каратаева Ф. Х., Клочков В. В. Спектроскопия ЯМР в органической химии. Ч. 1: Общая теория ЯМР. – Казань: Казанский федерал. ун-т, 2013. – 129 с.

этого поиск сигналов ЯМР от атомов водорода и получение ЯМР-спектров высокого разрешения осуществляли в земном магнитном поле.

В последнее время появилось много работ по применению ЯМР в науках о биологических объектах. Например, О. В. Яковлевой² изложены основы метода спектроскопии ядерного магнитного резонанса при изучении биологических объектов. В биологии ЯМР используется для определения пространственной структуры белка и динамических свойств биологических макромолекул. Для определения структуры белка в растворе авторы применяли криоэлектронную микроскопию и рентгеноструктурный анализ кристаллов белка.

В статье С. В. Моисеева с соавторами [5] обобщён международный и национальный опыт применения метода ЯМР для контроля качества лекарственных средств. ЯМР позволяет подтвердить подлинность активного вещества, определить его содержание в препарате и примеси. Показана возможность использования прямого метода для подтверждения подлинности вещества путём анализа спектральных данных ЯМР без необходимости сравнения с образцами стандарта. Авторы рекомендуют включить метод ЯМР в список обязательных методов для определения чистоты химических стандартных образцов при их аттестации.

В настоящее время разработано большое количество методик, позволяющих измерять различные параметры ЯМР с пространственным разрешением внутри образца. В случае использования ЯМР-томографии в медицине исследуемым «образцом» является организм человека. ЯМР-томография – одна из наиболее эффективных и безопасных (но и дорогостоящих) диагностических технологий в различных областях медицины [6].

Учёные национального исследовательского центра «Курчатовский институт» создали модель математической обработки выходных экспериментальных данных ядерно-магнитно-резонансной томографии. Разработан алгоритм сравнительного анализа 3D-моделей, полученных для одного и того же испытуемого человека с использованием различных режимов работы МР-томографа. Программная реализация алгоритма выпол-

² Яковлева О. В. ЯМР-спектроскопия для биологов. – М.: Мастерпринт, 2021. – 105 с.

нена в качестве сервиса системы «Нейровизуализация» цифровой лаборатории [7].

В работах иностранных исследователей рассматривались некоторые новые результаты применения ЯМР-методов. Так, синтез ЯМР и масс-спектропии (МС) применяется в интегративной структурной биологии, помогая учёным расшифровывать трёхмерную структуру сложных макромолекулярных узлов [8]. Для повышения чувствительности ЯМР Y. Wei с соавторами [9] указали на несколько методов, таких как динамическая ядерная поляризация и оптическая накачка с обменом спином, что направлено на преодоление недостатков обычного магнитного резонанса с низкой чувствительностью.

В обычных современных системах ЯМР-спектропии используются громоздкие сверхпроводящие дорогостоящие магниты. За последнее десятилетие достижения в области технологий с постоянными магнитами привели к появлению настольных ЯМР-спектрометров. В таких спектрометрах применяется метод ЯМР на кристалле, при котором вся необходимая электроника собрана на одной интегральной схеме, что позволяет реализовать её в сверхмалом форм-факторе и даёт большие перспективы для снижения общей стоимости системы [10]. В медицине последовательность градиентных и радиочастотных возбуждений оказалась очень важной для нейробиологических исследований, особенно функциональная и диффузионно-взвешенная МРТ [11].

Физико-химические специфические особенности ЯМР позволяют перенастраивать современные медицинские технологии на молекулярный уровень. Так, например, многоядерный магнитный резонанс позволяет локализовать молекулярную активность, которая играет центральную роль в различных заболеваниях, перейти от традиционной морфологической визуализации к молекулярной, точной диагностике и лечению. Магнитно-резонансная спектроскопия позволяет определять концентрации метаболитов в мозге, которые участвуют в энергетических процессах, выявлять здоровье нейронов и мембран, участвующих в нейротрансмиссии. Возможность выявления изменений в их концентрации фактически открывает путь к ранней диагностике и оценке лечения при различных патологиях. Таким образом, ЯМР позволил сформулировать основные прин-

ципы МРТ головного мозга вместе с обзором основных клинических применений [12].

Анализ исследований по проблемам ЯМР показал важность и широту применения во всех отраслях науки и производства. Однако студентам разных университетов и специальностей необходимо изучение ЯМР на разных уровнях сложности. Эта проблема ещё не решена, что позволяет сформулировать **противоречие** между объективной необходимостью изучения содержания модуля ЯМР на разных уровнях студентами инженерных и медицинских университетов и отсутствием вариативного содержания модуля ЯМР для этих уровней. Данное противоречие подтверждает актуальность нашего исследования.

Методология и методы исследования. Для реализации цели исследования применялись методы анализа и обобщения научной и методической литературы по проблемам содержания методов ЯМР, ядерной спектроскопии и магниторезонансной томографии, анализ программ обучения для разных специальностей бакалавриата и магистратуры инженерных и медицинских университетов.

Результаты исследования и их обсуждения. Описание ЯМР возможно на разных уровнях сложности. Мы выделяем классический и квантовый уровни. Конечно, классический уровень является менее сложным и менее точным, но в то же время он может быть рекомендован для некоторых специальностей университетов. Понятно, что на квантовом уровне изучения ЯМР могут применяться и качественные, и количественные закономерности. Рассмотрим интерпретацию ЯМР на всех этих уровнях.

На **классическом качественном уровне** достаточно знаний школьного курса физики. Выпускники школы знают, что атомы имеют ядра, в которых есть нуклоны: положительно заряженные протоны и нейтральные нейтроны. При вращении в целом положительно заряженных ядер они образуют круговые микротоки. Любые циркулирующие токи имеют собственное магнитное поле. Во внешнем магнитном поле каждый микроток стремится развернуться так, чтобы направления магнитных линий его поля совпали с направлениями линий внешнего магнитного поля. Когда вектор магнитной индукции микроточка начинает круговое прецессионное движение вокруг него с определённой ча-

стотой, зависящей от свойств атома, и его помещают в переменное электромагнитное поле с такой же частотой, ядро поглощает энергию и возбуждается. Такое возбуждённое состояние ядра является неустойчивым, поэтому спустя очень короткое время ядро испустит лишнюю энергию в виде цуга электромагнитной волны той же частоты. Регистрируя волну, излученную ядром во время расслабления (релаксации), формулируют вывод о структуре и составе ядра в целом.

На **квантовом качественном уровне** вводится понятие спина (собственного момента количества движения) и связанного с ним магнитного момента ядра. При помещении такого ядра во внешнее сильное магнитное поле, ядро становится осциллятором и его энергетические уровни расщепляются. Если частота посылаемой к ядру слабой электромагнитной волны совпадёт с появившейся у ядра квантованной частотой, возникнет резонанс, резко усиливающий амплитуду его осцилляций. Ядерный магнитный резонанс представляет собой резонансное поглощение электромагнитных волн атомными ядрами при изменении ориентации векторов их спинов в сильном постоянном магнитном поле. Этот эффект проявляется при воздействии слабого переменного электромагнитного поля радиочастотного диапазона, перпендикулярного магнитным линиям постоянного поля (рис. 1) [13].

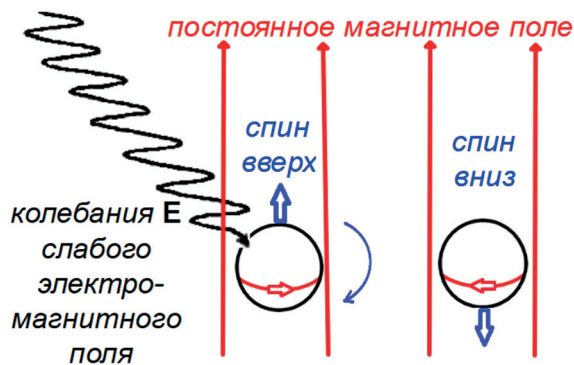


Рис. 1. Качественное объяснение ЯМР
Fig. 1. Qualitative explanation of nuclear magnetic resonance

Согласно законам квантовой механики, спин протона может быть направлен лишь «вверх» или «вниз». Связанный с этим магнитный момент также имеет два возможных направления. Во внешнем магнитном поле энергия протона зависит от ориентации его магнитного момента. Переход протона из

низкоэнергетического состояния в высокоэнергетическое может произойти при поглощении энергии, соответствующей разности их энергий. Это достигается облучением протона квантами электромагнитных волн с определённой частотой, связанной с изменением его энергии по формуле $\Delta E = h\nu$.

В веществе равные количества протонов во внешнем магнитном поле имеют противоположно направленные спины. Облучение вещества электромагнитными волнами с частотой ω вызовет массовый поворот спинов протонов, в результате которого все протоны будут иметь спины, направленные против поля. Такое массовое изменение ориентации протонов будет сопровождаться резонансным поглощением квантов электромагнитного поля.

ЯМР можно наблюдать только в образцах с большим числом ядер (10^{16}), используя специальные методики и высокочувствительные приборы. Для ядер водорода (протонов) в постоянном магнитном поле напряжённостью 10^4 Эрстед резонанс наступает при частоте радиоволн 42,58 МГц. Для других ядер в магнитных полях $10^3 \div 10^4$ Эрстед ЯМР наблюдается в диапазоне частот $1 \div 10$ МГц. В медицине с помощью ЯМР с разрешением $0,5 \div 1$ мм получают пространственное изображение внутренних органов человека.

Квантовый количественный уровень предполагает введение понятий: собственный спиновый магнитный момент ядра, гиромагнитное отношение, Лармора прецессия, ларморова частота, расщепление энергетических уровней ядра во внешнем магнитном поле.

Вращающееся вокруг своей оси ядро имеет собственный момент количества движения (угловой момент или спин) P . Магнитный момент ядра μ прямо пропорционален спину: $\mu = \gamma P$, где γ – так называемое гиромагнитное отношение – коэффициент пропорциональности магнитного и спинового моментов. Эта величина является характерной для каждого типа ядер и составляет:

$$2,647 \cdot 10^{-8} \text{ рад / T} \cdot \text{с для } {}^1_1\text{H},$$

$$0,673 \cdot 10^{-8} \text{ рад / T} \cdot \text{с для } {}^{13}_6\text{C}.$$

Во внешнем магнитном поле B_0 действует крутящий момент, который стремится ориентировать его параллельно направлению поля. Поэтому угловой момент ядра вызывает прецессию магнитного момента μ вокруг

оси **Z**. Такая прецессия называется Лармовой прецессией.

Магнитные свойства ядер, в свою очередь, обусловлены тем, что ядра атомов, вращающиеся вокруг собственной оси, имеют момент количества движения, который называется спином ядра. Спин характеризуется ядерным спиновым квантовым числом I , которое может принимать значения $0, 1/2, 1, 3/2, \dots$ и определяется числом протонов и нейтронов, составляющих ядро. Спиновое квантовое число как протона, так и нейтрона равно $1/2$, и в зависимости от того, спарены в ядре спины этих частиц или нет, ядро может характеризоваться нулевым или ненулевым значением I . Ядра с чётным числом протонов и чётным числом нейтронов (например, $^{12}_6\text{C}$ и $^{16}_8\text{O}$) имеют суммарный спиновый момент $I = 0$. Ядра, имеющие нечётное число протонов и нечётное число нейтронов, имеют целочисленный спин. Так, например, $I = 1$ у ядер $^{14}_7\text{N}$ и ^2_1H . Наилучшее для ЯМР расщепление квантовых энергетических уровней во внешнем магнитном поле появляется у изотопов с нечетной суммой нейтронов и протонов. Такие ядра имеют суммарный спин $I = 1/2$: ^1_1H , $^{19}_9\text{F}$, $^{13}_6\text{C}$, $^{17}_8\text{O}$. Поэтому они являются наибо-

лее пригодными для ЯМР-спектроскопии органических соединений.

Во внешнем магнитном поле напряжённостью H_0 ядро со спиновым квантовым числом I может принимать $(2I + 1)$ ориентаций, соответствующих $(2I + 1)$ энергетическим уровням. Ядра атомов со спином $I = 0$ имеют в магнитном поле только один энергетический уровень. Такие ядра не могут применяться в спектроскопии ЯМР.

Ядра водорода (протоны) имеют спиновое число $I = 1/2$. Во внешнем однородном магнитном поле напряжённостью H_0 имеют две ориентации спинов протонов: по направлению поля (ядерный магнитный момент μ параллелен приложенному полю H_0) и против направления поля (ядерный магнитный момент μ антипараллелен приложенному полю H_0) (рис. 2).

Ориентация по полю энергетически более выгодна, ей соответствует низший энергетический уровень E_1 , на котором будет находиться больше ядер, чем на уровне E_2 . Разность энергий уровней зависит от величины магнитного момента ядра, напряжённости магнитного поля и определяется выражением: $\Delta E = 2\mu H_0$.

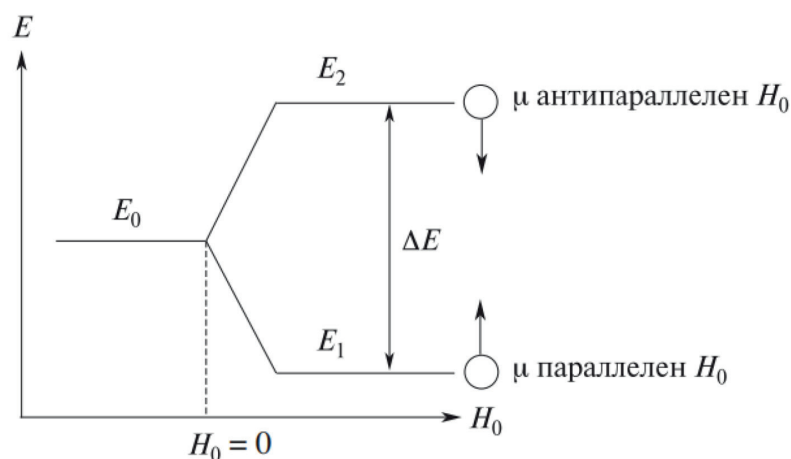


Рис. 2. Расщепление энергетических уровней протона в магнитном поле
Fig. 2. Splitting of proton energy levels in a magnetic field

При переходе с нижнего уровня на верхний ядро поглощает энергию $\Delta E = h\nu$. Из этого следует, что $h\nu = 2\mu H_0$, откуда: $\nu = 2\mu H_0/h$, где ν – частота электромагнитного излучения, соответствующая разности энергий этих уровней.

Если на ядра атомов, находящихся в сильном магнитном поле, воздействовать слабым переменным электромагнитным по-

лем и изменять его частоту (в радиочастотной области $10\text{--}500$ МГц), то при определённой частоте $\nu = \frac{\Delta E}{h}$ ядра будут поглощать энергию переменного электромагнитного поля и возбуждаться (переходить на верхний энергетический уровень). На спектрограмме при этом фиксируется пик. Изменяя частоту магнитного поля, можно обнаружить резо-

нансные сигналы различных типов от исследуемых ядер (например, от протонов, входящих в состав молекулы) и таким образом получить спектр анализируемого вещества.

Элементы физических знаний для разных уровней сложности изучения вариативного модуля ЯМР представлены в табл. 1.

Таблица 1

Элементы физических знаний для разных уровней сложности изучения вариативного модуля ЯМР

Уровни	Элементы физических знаний
Классический	Строение ядра атома, круговой ток, магнитное поле кругового тока, ориентация магнитного поля кругового тока во внешнем магнитном поле, частота обращения, резонансное поглощение энергии, излучение энергии
Квантовый	Спиновый момент ядра, магнитный момент ядра, гиромагнитное отношение, ларморова прецессия, ларморова частота, расщепление энергетических уровней ядра, магнетон Бора, квантовые уровни энергии, резонансное поглощение энергии

Проанализировав направления подготовки, существующие в современных медицинских и инженерных университетах, мы установили, что среди них имеются социально-гуманитарные специальности, например, 37.05.01 *Клиническая психология* или

38.03.01 *Экономика*. В программах обучения студентов этих специальностей физика не изучается. Но для знакомства студентов с современными научными и производственными технологиями им можно рекомендовать знакомство с ЯМР и ЯМР-технологиями на классическом уровне при изучении курсов «Концепции современного естествознания» с использованием знаний школьной физики.

Большая группа специальностей предусматривает изучение физики в вузе, но в них квантовая физика не рассматривается углубленно. К таким специальностям относятся, например, 31-05.01 *Лечебное дело* или 08.03.01 *Строительство*. Для студентов этих специальностей можно рекомендовать изучение ЯМР на квантовом качественном уровне.

В программах ряда специальностей квантовая физика изучается углубленно и является основой технологий производственной деятельности, например, 30.05.02 *Медицинская биофизика* и 11.03.04. *Электроника и нанoeлектроника*. Для таких специальностей, конечно, рекомендуется изучение ЯМР на квантовом количественном уровне.

Уровни изучения ЯМР в курсах физики разных специальностей медицинских и технических университетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Уровни изучения вариативного модуля ЯМР в курсах физики для разных специальностей медицинских и технических университетов

Уровни	Специальности медицинского университета	Специальности инженерного университета
Классический	39.03.02 <i>Социальная работа</i> 37.05.02 <i>Психология служебной деятельности</i> 37.05.01 <i>Клиническая психология</i>	38.03.01 <i>Экономика</i> 38.03.02 <i>Менеджмент</i> 42.03.01 <i>Реклама и связи с общественностью</i> 45.03.02 <i>Лингвистика</i> 54.03.01 <i>Дизайн</i>
Квантовый качественный	31.05.01 <i>Лечебное дело</i> 31.05.02 <i>Педиатрия</i>	08.03.01 <i>Строительство</i> 09.03.01 <i>Информатика и вычислительная техника</i> 13.03.01 <i>Теплоэнергетика и теплотехника</i>
Квантовый количественный	31.05.03 <i>Стоматология</i> 33.05.01 <i>Фармация</i> 30.05.02 <i>Медицинская биофизика</i> 12.04.04 <i>Биотехнические системы и технологии (магистратура)</i>	11.03.01 <i>Радиотехника</i> 11.03.04 <i>Электроника и нанoeлектроника</i> 11.05.01 <i>Радиоэлектронные системы и комплексы</i> 12.03.01 <i>Приборостроение</i> 12.03.04 <i>Биотехнические системы и технологии</i>

В медицинских университетах необходимо изучать физические основы МРТ, этапы МР-исследования, устройство МР-томографа и свойства МР-изображений. В настоящее время магнитно-резонансная то-

мография превратилась в универсальный инструмент для прижизненного исследования тканей. Хотя МРТ основана на квантово-механических свойствах частиц на субатомном уровне, большой ансамбль частиц в

ткани позволяет получить полуклассическое описание, доступ к которому относительно прост. На более высоком уровне МРТ изучается с применением всех рассмотренных выше законов ЯМР на квантовом качественном или количественном уровнях.

В инженерных университетах на первый план выходит ЯМР-спектроскопия, которая играет важную роль в промышленности, позволяя однозначно характеризовать различные фракции нефти, синтетические каучуки, пластмассы, глинистые сланцы, уголь, химические и фармацевтические продукты на основе количества и расположения линий в спектрах. ЯМР-технология обеспечивают информацию о структуре биополимеров, включая белковые молекулы в растворах, сопоставимую по достоверности с результатами рентгеноструктурного анализа. Для изучения этих технологий необходимо знать ЯМР на квантовом количественном уровне.

Заключение. Анализ исследований по проблемам ЯМР выявил его важность и широкие возможности применения в различ-

ных сферах науки и производства. Студентам разных специальностей и направлений подготовки в университетах необходимо изучение ЯМР на различных уровнях сложности в соответствии с представленным вариативным модулем. Классический уровень изучения рекомендуется для социально-гуманитарных направлений обучения университетов. Квантовый качественный уровень подходит для большинства медицинских и инженерных специальностей, не связанных с квантовой физикой. Для специальностей и направлений подготовки, требующих от студентов знаний в области квантовых технологий, рекомендуется квантовый количественный уровень. Это исследование имеет практическое значение для обучения студентов физическим основам современных методов и технологий в инженерных и медицинских вузах. Перспективы дальнейшего исследования – разработка содержания основ производственных технологий, основанных на ЯМР, для студентов инженерных и медицинских университетов.

Список литературы

1. Кессених А. Как у нас в СССР покоряли ЯМР. Развитие аналитических методов ЯМР в СССР и России // Аналитика. Научно-технический журнал. 2016. № 3. С. 90–100.
2. Синявский Г. П., Черныш Ю. А., Морозов М. Г. Ядерный магнитный резонанс как аналитический метод в химии и медицине // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. № 9. С. 58–64.
3. Устынюк Ю. А. Химия и химическое образование на рубеже веков: смена целей, методов и поколений специалистов // Российский химический журнал. 2001. № 2. С. 83–91.
4. Куприянов П. А., Дмитриев К. А., Чижик А. В. О некоторых усовершенствованиях регистрации ядерного магнитного резонанса в земном поле // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2016. Т. 3, № 61. С. 59–69.
5. Моисеев С. В., Кузьмина Н. Е., Лутцева А. И. Метод ЯМР в отечественной и зарубежной фармакопее для оценки качества лекарственных средств // Ведомости Научного центра экспертизы средств медицинского применения. 2022. Т. 12, № 1. С. 8–23. DOI: 10.30895/1991-2919-2022-12-1-8-23.
6. Кузнецов И. О. Практика исследования объектов экспертизы методом спектроскопии ЯМР // Теория и практика судебной экспертизы: международный опыт, проблемы, перспективы: сб. науч. тр. М.: Изд-во Университет МВД, 2022. С. 176–182.
7. Enyagina I. M., Polyakov A. N., Kartashov S. I., Ushakov V. L. Comparative Analysis of Pulse Sequence Scenarios of Nuclear Magnetic Resonance Imaging of Human Brain // Phys. Part. Nuclei Lett. 2023. Vol. 20. P. 1438–1445. DOI: 10.1134/S1547477123060109.
8. Erba E. B., Pastore A. The Complementarity of Nuclear Magnetic Resonance and Native Mass Spectroscopy in Probing Protein-Protein Interactions // Advances in Experimental Medicine and Biology. 2024. Vol. 3234. P. 109–123. DOI: 10.1007/978-3-031-52193-5_8.
9. Wei Y., Yang C., Jiang H., Qian Li, Feng Che, Shang Wan, Shan Yao, Feifei Gao, Tong Zhang, Jiazheng Wang, Bin Song. Multi-nuclear magnetic resonance spectroscopy: state of the art and future directions // Insights Imaging. 2022. Vol. 13. P. 135. DOI: 10.1186/s13244-022-01262-z.
10. Anders J., Dreyer F., Krüger D. On-Chip Nuclear Magnetic Resonance // Handbook of Biochips / eds. M. Sawan. New York: Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-1-4614-3447-4_23.
11. Polzehl J., Tabelow K. Magnetic Resonance Imaging in a Nutshell // Magnetic Resonance Brain Imaging. Cham.: Springer, 2023. P. 5–15. DOI: 10.1007/978-3-031-38949-8_2.
12. Squarcina L., Brambilla P. Magnetic Resonance Spectroscopy // Computational Neuroscience. Neuromethods / eds. D. Stoyanov [et. al.]. New York, 2023. Vol. 199. DOI: 10.1007/978-1-0716-3230-7_12.
13. Ядерный магнитный резонанс. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e202.htm> (дата обращения 20.04.2024). Текст: электронный.

Информация об авторах

Машиныан Александр Анатольевич, доктор педагогических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «МЭИ»; Россия, 111250 г. Москва, ул. Красноказарменная 17, стр. 3; mash404@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5937-9367>.

Кочергина Нина Васильевна, доктор педагогических наук, профессор, Российский национальный исследовательский университет им. Н. И. Пирогова; 117513, Россия, г. Москва, ул. Островитянова 1; kachergina@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6841-6369>.

Вклад авторов

Машиныан А. А. – разработка методологии и направления анализа материалов исследования.
Кочергина Н. В. – анализ материалов статьи и её оформление.

Для цитирования

Машиныан А. А., Кочергина Н. В. Изучение ядерного магнитного резонанса в инженерных и медицинских университетах // Учёные записки Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 19, № 3. С. 27–36. DOI: 10.21209/2658-7114-2024-19-3-27-36.

**Статья поступила в редакцию 20.04.2024; одобрена после рецензирования 28.05.2024;
принята к публикации 30.05.2024.**

References

1. Kessenich, A. How NMR was conquered in the USSR. Development of analytical NMR methods in the USSR and Russia. *Analytics. Scientific and technical journal*, no. 3, pp. 90–100, 2016. (In Rus.)
2. Sinyavsky, G. P., Chernysh, Yu. A., Morozov, M. G. Nuclear magnetic resonance as an analytical method in chemistry and medicine. *Electromagnetic waves and electronic systems*, no. 9, pp. 58–64, 2014. (In Rus.)
3. Ustynyuk, Yu. A. Chemistry and chemical education at the turn of the century: changing goals, methods and generations of specialists. *Russian Chemical Journal*, no. 2, pp. 83–91, 2001. (In Rus.)
4. Kupriyanov, P. A., Dmitriev, K. A., Chizhik, A. V. On some improvements in the registration of nuclear magnetic resonance in the Earth's field. *Bulletin of the St. Petersburg State University*, no. 61, pp. 59–69, 2016. (In Rus.)
5. Moiseev, S. V., Kuzmina, N. E., Luttseva, A. I. The NMR method in domestic and foreign pharmacopoeias for evaluating the quality of medicines. *Vedomosti Scientific Center for expertise of medical products*, no. 1, pp. 8–23, 2022. (In Rus.)
6. Kuznetsov I. O. The practice of examining objects of expertise by NMR spectroscopy. Theory and practice of forensic examination: international experience, problems, prospects. *Collection of scientific papers*. Moscow: Publishing House of the University of the Ministry of Internal Affairs, 2022: 176–182. (In Rus.)
7. Enyagina, I. M., Polyakov, A. N., Kartashov, S. I., Ushakov, V. L. Comparative Analysis of Pulse Sequence Scenarios of Nuclear Magnetic Resonance Imaging of Human Brain. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 20, pp. 1438–1445, 2023. DOI: 10.1134/S1547477123060109. (In Eng.)
8. Erba, E. B., Pastore, A. The Complementarity of Nuclear Magnetic Resonance and Native Mass Spectrometry in Probing Protein-Protein Interactions. Vega, M. C., Fernández, F. J. (eds) *Advanced Technologies for Protein Complex Production and Characterization. Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol. 3234. Springer, Cham, 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-52193-5_8. (In Eng.)
9. Wei, Y., Yang, C., Jiang, H., Qian Li, Feng Che, Shang Wan, Shan Yao, Feifei Gao, Tong Zhang, Jiazheng Wang, Bin Song. Multi-nuclear magnetic resonance spectroscopy: state of the art and future directions. *Insights Imaging* 13, pp. 135, 2022. DOI: 10.1186/s13244-022-01262-z. (In Eng.)
10. Anders, J., Dreyer, F., Krüger, D. On-Chip Nuclear Magnetic Resonance. Sawan, M. (eds) *Handbook of Biochips*. Springer, New York, 2022. DOI: 10.1007/978-1-4614-3447-4_23. (In Eng.)
11. Polzehl, J., Tabelow, K. Magnetic Resonance Imaging in a Nutshell. *Magnetic Resonance Brain Imaging*. Springer, Cham, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-38949-8_2. (In Eng.)
12. Squarcina, L., Brambilla, P. Magnetic Resonance Spectroscopy. Stoyanov, D., Draganski, B., Brambilla, P., Lamm, C. (eds) *Computational Neuroscience. Neuromethods*, vol. 199. New York, 2023. DOI: 10.1007/978-1-0716-3230-7_12. (In Eng.)
13. Nuclear magnetic resonance. Web. 20.04.2024. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e202.htm>. (In Rus.)

Information about the authors

Mashinyan Alexander A., Doctor of Pedagogy, Professor, National Research University "MPEI"; 3 p., 17 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russia; mash404@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5937-9367>.

Машиньян А. А., Кочергина Н. В.

Изучение ядерного магнитного резонанса в инженерных и медицинских университетах

Kochergina Nina V., Doctor of Pedagogy, Professor, N. I. Pirogov Russian National Research University;
1 Ostrovityanova st., Moscow, 117513, Russia; kachergina@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6841-6369>.

Contribution of authors to the article

Mashinyan A. A. – has developed the methodology and direction of the research materials' analysis.
Kochergina N. V. – has analyzed the materials of the article, made the design of the article.

For citation

Mashinyan A. A., Kochergina N. V. Study of Nuclear Magnetic Resonance at Engineering and Medical Universities // Scholarly Notes of Transbaikal State University. 2024. Vol. 19, no. 3. P. 27–36. DOI: 10.21209/2658-7114-2024-19-3-27-36.

***Received: April 20 2024; approved after reviewing May 28 2024;
accepted for publication May 30 2024.***