

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»  
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет  
Кафедра химической и биологической физики**

академик РАН



УТВЕРЖДАЮ

Декан ФФ

А. Е. Бондарь

2020 г.

**Рабочая программа дисциплины**

**ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЯМР И ГРАДИЕНТНЫЕ ЯМР МЕТОДЫ**

направление подготовки: **03.04.02 Физика, Курс 1, семестр 2**  
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения

**Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	72	32			18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачетных единицы из них: - контактная работа 36 часов Компетенции ПК-1, ПК-2										

Разработчик:

д.ф.-м.н.

 К.Л. Иванов

Зав. кафедрой ХиБФ ФФ НГУ

д.ф.-м.н., проф.

 С. А. Дзюба

Руководитель программы

д.ф.-м.н.

 И. Б. Логашенко

Новосибирск, 2020

<b>Содержание</b>	
<b>Аннотация</b> .....	3
1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. ....	5
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы. ....	5
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу. ....	6
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий. ....	6
5. Перечень учебной литературы. ....	11
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. ....	11
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. ....	11
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. ....	12
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. ....	12
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. ....	12

## Аннотация

к рабочей программе дисциплины «Твердотельный ЯМР и градиентные ЯМР методы»

Направление: **03.04.02 Физика**

**Направленность (профиль): Общая и фундаментальная физика**

Программа дисциплины «Твердотельный ЯМР и градиентные ЯМР методы» составлена в соответствии с требованиями СУОС к уровню магистратуры по направлению подготовки **03.04.02 Физика, направленность «Общая и фундаментальная физика»**, а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется на физическом факультете Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ) кафедрой химической и биологической физики в качестве дисциплины по выбору. Дисциплина изучается студентами первого курса магистратуры физического факультета в весеннем семестре.

Цель курса – знакомство с современными методами спектроскопии ЯМР в твердом теле и градиентными методами ЯМР.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующих профессиональных компетенций:

**ПК-1 способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта**

**ПК-2 способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности.**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **Знать:** формализм матрицы плотности, основные методы решения уравнения Лиувилля – фон Неймана. Знать основные импульсные последовательности ЯМР в твердом теле; основные принципы ЯМР томографии. Знать принципы использования градиентных методов в ЯМР спектроскопии. Знать принципы использования градиентных методов для изучения явлений массопереноса; основные последовательности импульсной спектроскопии магнитного резонанса в твердом теле и методы аналитического и численного решения уравнения Лиувилля – фон Неймана для матрицы плотности; ориентироваться в соответствующей области научной литературы.
- **Уметь:** проводить расчеты спиновой динамики для базовых импульсных экспериментов по ЯМР в твердом теле. Уметь проводить расчеты спиновой динамики в ЯМР экспериментов в присутствии импульсных градиентов магнитного поля.
- **Владеть:** основными теоретическими методами и понятиями современной спектроскопии ЯМР: формализм матрицы плотности, операторный формализм, формализм неприводимых тензоров, теория среднего гамильтониана, теория Флоке; навыками постановки и решения научных задач методами импульсной спектроскопии магнитного резонанса: операторный формализм, теория среднего гамильтониана, теория Флоке.

Курс рассчитан на один семестр (2-й). Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, консультации, самостоятельная работа студента, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: решение задач из задания для самостоятельного решения

Промежуточная аттестация: экзамен

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет **72** академических часа / **2** зачетные единицы.

## 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Цель учебного курса «Твердотельный ЯМР и градиентные ЯМР методы» – предоставление набора необходимых сведений в области подходов и методов, применяемых в современной спектроскопии ЯМР в твердом теле, градиентных методов ЯМР, подходов ЯМР томографии.

Профессиональная компетенция ПК-1 - способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики (*в части твердотельных ЯМР и градиентных ЯМР методов*) и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта.

Профессиональная компетенция ПК-2 - способность свободно владеть разделами физики (*в части твердотельных ЯМР и градиентных ЯМР методов*), необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности.

Материал лекционного курса увязывается с передовыми исследованиями всюду, где это допускается уровнем знаний и подготовки студентов. Специально указываются темы, активно обсуждающиеся в текущей профессиональной научной литературе.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **Знать:** формализм матрицы плотности, основные методы решения уравнения Ливилля – фон Неймана. Знать основные импульсные последовательности ЯМР в твердом теле; основные принципы ЯМР томографии. Знать принципы использования градиентных методов в ЯМР спектроскопии. Знать принципы использования градиентных методов для изучения явлений массопереноса (ПК-1.1); основные последовательности импульсной спектроскопии магнитного резонанса в твердом теле и методы аналитического и численного решения уравнения Ливилля – фон Неймана для матрицы плотности; ориентироваться в соответствующей области научной литературы (ПК-2.1).
- **Уметь:** проводить расчеты спиновой динамики для базовых импульсных экспериментов по ЯМР в твердом теле. Уметь проводить расчеты спиновой динамики в ЯМР экспериментов в присутствии импульсных градиентов магнитного поля (ПК-2.2).
- **Владеть:** основными теоретическими методами и понятиями современной спектроскопии ЯМР: формализм матрицы плотности, операторный формализм, формализм неприводимых тензоров, теория среднего гамильтониана, теория Флоке (ПК-1.3); навыками постановки и решения научных задач методами импульсной спектроскопии магнитного резонанса: операторный формализм, теория среднего гамильтониана, теория Флоке (ПК-2.3).

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Твердотельный ЯМР и градиентные ЯМР методы» реализуется для обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика, общая и фундаментальная физика. Курс относится к числу специальных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой химической и биологической физики. В нем рассматриваются описание спиновой динамики в терминах матрицы плотности, методы решения уравнения, описывающих ее временную эволюцию. Особое внимание уделено физическим идеям и принципам импульсной спектроскопии ЯМР в твердом теле и описанию твердотельных импульсных последовательностей. В рамках курса рассматри-

ваются градиентные методы ЯМР и их применение для получения спектров ЯМР высокого разрешения, для изучения явлений диффузии и массопереноса, для получения трехмерных изображений объектов (ЯМР томография). В результате прохождения курса у студентов кафедры физического факультета должно сформироваться представление о том, каким образом импульсные последовательности воздействуют на спиновые системы, какие экспериментальные методы используются для решения тех или иных задач спектроскопии и томографии ЯМР, каковы ограничения этих методов. Эти знания необходимы исследователю в области химической и биологической физики как для решения задач, связанных с применением ЯМР методов, так и для понимания научной литературы (статей) в этой области. Необходимыми предпосылками для успешного освоения курса являются следующие:

- В цикле математических дисциплин: знание основ математического анализа, линейной алгебры и методов математической физики.
- В цикле общеприродных дисциплин необходимыми предпосылками являются знание и умение применять основные принципы квантовой механики, молекулярной и статистической физики.

**3. Трудоемкость дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	72	32			18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачетных единицы из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1, ПК-2										

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, консультации, самостоятельная работа студента, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: решение задач из задания для самостоятельного решения

Промежуточная аттестация: экзамен

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет **72** академических часа / **2** зачетные единицы.

**4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)					Кон- сульта- ции пе- ред эк- заменом (часов)	Проме- жуточная аттеста- ция (в период сессии) (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежу- точной аттестаци и		
				Лек- ции	Прак- тиче- ские заня- тия				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	<b>Анизотропные взаимодействия в твердотельном ЯМР</b> Тензора магнитных взаимодействий. Запись тензоров в системе главных осей и в лабораторной системе отсчета. Эйлеровы вращения системы координат, составные вращения. Статические спектры ЯМР в твердом теле.	1-2	6	4		2			
2	<b>Усреднение анизотропных взаимодействий в твердотельном ЯМР</b> Неприводимые тензора, сферический базис, матрицы Вигнера. Вращение образца под магическим углом: усреднение анизотропных	3-4	6	4		2			

	взаимодействий. Развязка взаимодействий при помощи импульсов, схема Ли-Гольдберга.								
3	<b>Импульсные эксперименты в твердотельном ЯМР</b> Развязка спиновых взаимодействий при помощи импульсов в статическом случае. Кросс-поляризация, условие Хартмана-Хана. Развязка взаимодействий в экспериментах с вращением образца под магическим углом. Резонансные эффекты в экспериментах с вращением образца под магическим углом. Рекаплинг взаимодействий в экспериментах с вращением образца под магическим углом. Импульсные эксперименты с квадрупольными ядрами.	5-6	6	4		2			
4.	<b>Градиентные методы в спектроскопии ЯМР</b> Выбор пути переноса	7-8	6	4		2			



	когерентности в ЯМР. Методы быстрой регистрации двумерных спектров ЯМР. Измерение коэффициентов диффузии методами ЯМР. Эксперименты DOSY.								
5.	<b>Принципы ЯМР томографии</b> Импульсные методы в ЯМР томографии. Первичное эхо и градиентное эхо. Кодирование изображений при помощи импульсных градиентов поля. Выбор среза, частотное кодирование и фазовое кодирование. Восстановление изображений. k-пространство. Последовательности TSE и EPI	9-10	6	4		2			
6.	<b>Методы контрастирования в МРТ</b> T <sub>1</sub> и T <sub>2</sub> взвешенные изображения. Парамагнитные контрастные агенты. Другие методы получения контраста.	11-13	10	6		4			
7.	<b>Приложения МРТ</b> Конструкция ЯМР томографа. МР-перфузия,	14-16	10	6		4			

МР-диффузия, МР- ангиография. Функциональная МРТ.									
Групповая консультация		2						2	
Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18					18		
Экзамен		4							2
<b>Всего</b>		<b>72</b>	<b>32</b>			<b>18</b>	<b>18</b>	<b>2</b>	<b>2</b>

### Программа и основное содержание лекций (32 часа)

#### **I. Анизотропные взаимодействия в твердотельном ЯМР**

##### **1. Тензора взаимодействий (4 часа)**

Тензора магнитных взаимодействий. Запись тензоров в системе главных осей и в лабораторной системе отсчета. Эйлеровы вращения системы координат, составные вращения. Статические спектры ЯМР в твердом теле.

##### **2. Усреднение анизотропных взаимодействий в твердотельном ЯМР (4 часа)**

Неприводимые тензора, сферический базис, матрицы Вигнера. Вращение образца под магическим углом: усреднение анизотропных взаимодействий. Развязка взаимодействий при помощи импульсов, схема Ли-Гольдберга.

#### **II. Импульсные эксперименты в твердотельном ЯМР**

##### **1. Статические эксперименты (2 часа)**

Развязка спиновых взаимодействий при помощи импульсов в статическом случае. Кросс-поляризация, условие Хартмана-Хана.

##### **2. Эксперименты с вращением под магическим углом (2 часа)**

Развязка взаимодействий в экспериментах с вращением образца под магическим углом. Резонансные эффекты. Рекаплинг взаимодействий в экспериментах с вращением образца под магическим углом. Эксперименты с квадрупольными ядрами

#### **III. Градиентные методы в спектроскопии ЯМР (4 часа)**

Выбор пути переноса когерентности в ЯМР. Методы быстрой регистрации двумерных спектров ЯМР. Измерение коэффициентов диффузии методами ЯМР. Эксперименты DOSY.

#### **IV. ЯМР томография**

##### **1. Принципы МР томографии (4 часа)**

Импульсные методы в ЯМР томографии. Первичное эхо и градиентное эхо. Кодирование изображений при помощи импульсных градиентов поля. Выбор среза, частотное кодирование и фазовое кодирование. Восстановление изображений. k-пространство. Последовательности TSE и EPI.

##### **2. Методы контрастирования в МРТ (6 часов)**

$T_1$  и  $T_2$  взвешенные изображения. Парамагнитные контрастные агенты. Другие методы получения контраста.

##### **3. Приложения МРТ (6 часов)**

### Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	18
Подготовка к экзамену	18

#### 5. Перечень учебной литературы.

##### 5.1. Основная литература

1. Дзюба С. А., «Основы магнитного резонанса: учебное пособие» Новосибирск: НГУ, 2010.

##### 5.2. Дополнительная литература

2. Эрнст Р. Р., Боденхаузен Д., Вокаун А., «ЯМР в одном и двух измерениях», М.: Мир, 1990.
3. Абрагам А., «Ядерный магнетизм», М.: Издательство иностранной литературы, 1984..

#### 6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

1. Эрнст Р. Р., Боденхаузен Д., Вокаун А., «ЯМР в одном и двух измерениях», М.: Мир, 1990.

#### 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

##### 7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются.

##### 7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Для реализации дисциплины Твердотельный ЯМР и градиентные ЯМР методы используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации;

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся;

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.**

### **10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

#### ***Текущий контроль***

Текущий контроль осуществляется в виде задач для самостоятельного решения. Оценка знаний, умений, навыков и освоения компетенций обучающимися в рамках текущего контроля может проводиться согласно шкале и критериям, представленным ниже.

#### ***Промежуточная аттестация***

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленные компетенции ПК-1 и ПК-2 сформированы не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области Твердотельных ЯМР и градиентных ЯМР методов в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене с учётом результатов текущего контроля успеваемости. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию, по билетам, в устной форме. Билет состоит из двух вопросов.

Для получения оценки «отлично» (продвинутый уровень усвоения компетенций) необходимо развернуто ответить на два вопроса из билета, аргументированно ответить на дополнительные вопросы. В качестве дополнительного вопроса может быть использована задача, аналогичная задачам для самостоятельного решения в течении семестра. Для получения оценки «отлично» необходимо аргументировать алгоритм решения, допускается ошибка в численном ответе.

Для получения оценки «хорошо» (базовый уровень усвоения компетенций) нужно ответить на два вопроса билета, допускается несколько несущественных ошибок. Допускается несколько неточностей или одна-две ошибки в ответах на дополнительные вопросы.

Для получения на устном экзамене оценки «удовлетворительно» (пороговый уровень усвоения компетенций) необходимо ответить хотя бы на один вопрос билета.

Оценка «неудовлетворительно» - уровень усвоения компетенций не сформирован.

Обучающийся, имеющий неудовлетворительные результаты при прохождении промежуточной аттестации, обязан ликвидировать академическую задолженность по дисциплине, согласно установленным факультетом срокам прохождения повторной промежуточной аттестации. Сроки проведения повторной промежуточной аттестации согласовываются с преподавателем и утверждаются распоряжением декана.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

### Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Твердотельный ЯМР и градиентные ЯМР методы».

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1 ПК 2.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 2.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.

Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.3 ПК 2.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.
-----------------------------------	------------------	--	--	--	---

### Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

#### Примеры некоторых типовых заданий для самостоятельного решения для проведения текущего контроля успеваемости обучающихся.

1. Вывести формулы для зависимости от времени  $D_{zz}$  (диполь-дипольное взаимодействие) и  $\sigma_{zz}$  (анизотропия химического сдвига) для случая вращения образца под магическим углом, рассмотреть два последовательных вращения  $\Omega_{RR} \rightarrow \Omega_{RL}$ . Как взаимодействия меняются во времени, чему равны их средние величины?
2. Покажите, что для спина 1 последовательность твердотельного эха рефокусирует квадрупольное взаимодействие.
3. Пользуясь теорией среднего гамильтониана, объясните, как работает последовательность твердотельного эха.
4. Как модифицировать условие кросс-поляризации  $\omega_{1I} = \omega_{1S}$  при наличии вращения образца под магическим углом (случай CP-MAS)?
5. Пользуясь теорией среднего гамильтониана объясните, как работает метод рекаплинга HORROR.
6. Объясните, как работает последовательность RFDR.
7. Выведите выражение для спада сигнала спинового эха (последовательность первичного эха) в присутствии диффузии молекул в образце и постоянного градиента поля.
8. Объясните, как происходит выбор пути переноса когерентности в последовательности OPSY.
9. Объясните принцип работы MPT последовательностей FLASH и RARE.

#### Вопросы на экзамен

*На проверку сформированности компетенции ПК-1:*

1. Тензора магнитных взаимодействий в ЯМР. Запись тензоров в системе главных осей и в лабораторной системе отсчета. Эйлеровы вращения системы координат, составные вращения.
2. Статические спектры ЯМР в твердом теле.
3. Неприводимые тензора, сферический базис, матрицы Вигнера. Вращение образца под магическим углом: усреднение анизотропных взаимодействий.
4. Развязка взаимодействий при помощи импульсов, схема Ли-Гольдберга.
5. Статические эксперименты в твердотельном ЯМР: Развязка спиновых взаимодействий.
6. Статические эксперименты в твердотельном ЯМР: Кросс-поляризация.
7. Развязка взаимодействий в ЯМР экспериментах с вращением образца под магическим углом.
8. Резонансные эффекты в ЯМР экспериментах с вращением образца под магическим углом.

*На проверку сформированности компетенции ПК-2:*

9. Рекаплинг взаимодействий в экспериментах с вращением образца под магическим углом.
10. Импульсные ЯМР эксперименты с квадрупольными ядрами.
11. Выбор пути переноса когерентности в ЯМР.
12. Методы быстрой регистрации двумерных спектров ЯМР.

13. Измерение коэффициентов диффузии методами ЯМР. Эксперименты DOSY.
14. Импульсные методы в ЯМР томографии: первичное эхо и градиентное эхо. Кодирование изображений при помощи импульсных градиентов поля.
15. Выбор среза и фазовое кодирование. Восстановление изображений. k-пространство.
16.  $T_1$  и  $T_2$  взвешенные МРТ изображения.

### Пример экзаменационного билета

<p>МИНОБРНАУКИ РОССИИ</p> <p>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)</p> <p>Физический факультет</p>
<p><b>ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № _____</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Статические спектры ЯМР в твердом теле (на компетенцию ПК-1).</li><li>2. Измерение коэффициентов диффузии методами ЯМР. Эксперименты DOSY (на компетенцию ПК-2).</li></ol> <p>Составитель _____ / Иванов К.Л. / (подпись)</p> <p>« ____ » _____ 20 ____ г.</p>

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации фонда оценочных средств  
по дисциплине «Твердотельный ЯМР и градиентные ЯМР методы»  
по направлению подготовки 03.04.02 Физика  
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного