

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

# Квантовая радиофизика

Лекция 1

Санкт-Петербург, 2017

# Небольшое вступление



## О чем будет курс?

- Принципы наблюдения квантовых магнитных явлений в радиочастотном диапазоне
- ЯМР, ЭПР, ЯКР



# Где применить ЯМР

- Аналитические технологии
- Медицинские технологии
- Контроль качества
- Судебная экспертиза



ITMO UNIVERSITY

Обзорная  
лекция по  
квантовой  
механике  
и атомной  
физике ЯМР

ITMO *re than a*  
UNIVERSITY



# Ядерный магнитный резонанс

- На данный момент существует два описания ядерного магнитного резонанса: «практическое» и «теоретическое»
- Теоретическое описывает поведение частиц и их распределение по квантовым энергетическим уровням
- Практическое описывает поведение макроскопической намагниченности в радиочастотном поле



# Ядерный спин

- Общий момент двух описаний – существование ядерной макроскопической намагниченности у групп ядер с ненулевым спином
- Ненулевой ядерный спин возникает вследствие нескомпенсированности нуклонных (протонных и нейтронных) спинов
- При наличии у ядра спина у него есть собственный магнитный момент



## Спин и изотопный состав

- Наличие спина определяется рассматриваемым изотопом
- ЯМР-чувствительные изотопы:  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^9\text{Be}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{B}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{19}\text{F}$ ...
- ЯМР-нечувствительные изотопы:  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ...





# Природное содержание ИЗОТОПОВ

- Для наблюдения ЯМР имеет большое значение также естественное содержание изотопа
- Природное содержание:  $^1\text{H}$  – 99.98%,  $^{13}\text{C}$  – 1.1%,  $^{17}\text{O}$  – 0.04%
- Природное содержание:  $^{12}\text{C}$  – 98.9%,  $^{16}\text{O}$  – 99.76%,  $^{18}\text{O}$  – 0.2%



# Ядерный магнитный момент

- Четное количество протонов и нейтронов: нулевой спин  $I=0$
- Нечетное количество протонов и нейтронов: целый спин  $I=1, I=3, I=4\dots$
- Нечетное количество или протонов или нейтронов: полуцелый спин  $I=1/2, I=3/2\dots$
- Связанный магнитный момент (полный)

$$|\mu| = -\gamma\hbar\sqrt{I(I+1)}$$



## Зеемановское расщепление

- Потенциальная энергия частицы с магнитным моментом во внешнем постоянном магнитном поле зависит от её ориентации относительно поля
- Детектируемые уровни энергии (собственные состояния) частицы при этом будут определяться величиной проекции спина на направление магнитного поля ( $z$ )
- $m = -2l+1 \dots +2l+1$ , всего  $2l+1$  состояний

$$\mu_z = \gamma \hbar m$$



## Зеемановское расщепление

- Энергия собственных состояний частицы определяется взаимодействием с магнитным полем

$$E_m = -\mu_z B_0 = -\gamma \hbar m B_0$$

- Результат – равноотстоящие энергетические уровни с частотой перехода между соседними уровнями

$$\omega_0 = \gamma B_0$$



## Переходы между энергетическими уровнями

- Расчет вероятностей перехода показывает, что переходы возможны только между соседними энергетическими уровнями
- Кроме того, переходы возможны только при перпендикулярности переменного магнитного поля постоянному



# Ядро атома водорода

- 1 протон
- $l=1/2, m=-1/2\dots+1/2$
- Природное содержание: 99.98%,
- $\gamma = 26.75 \times 10^7 \text{ Рад}/(\text{с} \cdot \text{Тл}) = 42.57 \text{ МГц}/\text{Тл}$



# Распределение Больцмана

- Согласно распределению Больцмана при наличии большого числа частиц энергетические уровни Зеемановского расщепления будут иметь разное ожидаемое заселения

$$\frac{N_+}{N_-} = e^{-\frac{\hbar\omega_0}{kT}}$$

- Для поля в 1.5 Т разница в 0,001%



# Квантовая реальность

- При этом нельзя сказать, что больше частиц заселяет верхний уровень, чем нижний (если только не провести непосредственное измерение энергии всех частиц)
- Сами частицы всегда пребывают (описываются волновой функцией) суперпозиции состояний, а вся система – суперпозицией всех возможных комбинаций всех частиц





## Ожидаемые классические следствия

- В среднем разница между вероятностями заселенностей энергетических уровней приведет к появлению макроскопической намагниченности

- Величина намагниченности

$$M_0 \approx N \frac{\gamma^2 \hbar^2 I(I + 1)}{3kT}$$

- Природное содержание изотопа определяет  $N$  в  $M_0$



# Ядерный магнитный резонанс

- Сами частицы всегда пребывают (описываются волновой функцией) суперпозиции состояний, а вся система – суперпозицией всех возможных комбинаций всех частиц
- Воздействие переменным магнитным полем на систему частиц вызывает её переход в другое состояние



# Переходы и излучение

- После воздействия на систему РЧ энергией и переходе её в неравновесное состояние она стремится вернуться в равновесное состояние
- Процесс перехода в равновесное состояние – релаксация сопровождается спонтанными и вынужденными переходами и излучением РЧ энергии



## Переходы и излучение

- Центральный вклад в релаксацию – взаимодействие с окружающими частицами (изначально – с кристаллической решеткой), флуктуирующими на резонансных частотах системы
- Такой процесс релаксации спин-решеточная релаксация



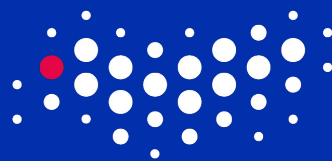
# Излучение и волны

- Стоит отметить, что излучение вследствие релаксации – чрезвычайно низкая ( $\sim \text{нВ}$ ) величина и не объясняет величину принимаемого сигнала ЯМР ( $\sim \text{мВ}$ )
- С квантовой точки зрения величина описывается передачей энергии через виртуальные фотоны
- С классической точки зрения излучение наблюдается в дальнем поле, сигнал ЯМР – в ближнем



## Центральный пункты

- У некоторых изотопов есть спин и связанный с ним магнитный момент
- Совокупность магнитных моментов образует макроскопическую намагниченность
- Возможно резонансное воздействие на систему магнитным РЧ полем, перпендикулярным постоянному магнитному полю



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Спасибо за внимание!**

Санкт-Петербург, 2017