

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



Природное содержание ИЗОТОПОВ

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



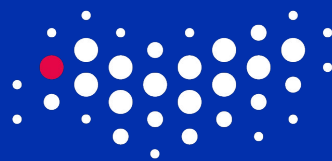
Излучение и волны

- 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