УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Квантовая радиофизика

Лекция 1

Санкт-Петербург, 2017

ITMO UNIVERSITY

Небольшое вступление

ITMOre than a UNIVERSITY

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

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

IT'sMOre than a UNIVERSITY

Природное содержание изотопов

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

IT'sMOre than a UNIVERSITY

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…
- Нечетное количество или протонов или нейтронов: полуцелый спин *I*=1/2, *I*=3/2…
- Связанный магнитный момент (полный)

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

IT'sMOre than a UNIVERSITY

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*=-2*l*+1…+2*l*+1, всего 2*l*+1 состояний

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

IT'S MOre than a UNIVERSITY

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

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

IT'sMOre than a UNIVERSITY

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
- I=1/2, m=-1/2…+1/2
- Природное содержание: 99.98%,
- γ= 26.75x10^7 Рад/(с*Тл) = 42.57 МГц/Тл

IT'sMOre than a UNIVERSITY

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%

IT'sMOre than a UNIVERSITY

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

IT'sMOre than a UNIVERSITY

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 (~нВ) величина и не объясняет величину принимаемого сигнала ЯМР (~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