

Мюонная спиновая спектроскопия

Вадимов Василий

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

30 марта 2017 г.

μ SR *otation*
elaxation
esonance

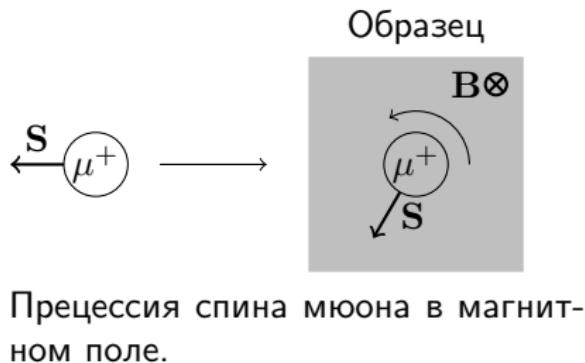
m s Applied*
u p Elementary
o i Particle
n n Physics

*(to basic research in
Materials Science
and Chemistry)

Характеристики мюонов

Заряд	$e_\mu = e$
Масса	$m_\mu = 207m_e = 0.11m_p$
Спин	$s = 1/2$
Магнитный момент	$\mu_\mu = 3.18\mu_p = 0.0048\mu_e$
Гиromагнитное отношение	$\gamma_\mu = \frac{e}{m_\mu c} = 13.5 \text{ кГц/Гс}$
Схема распада	$\mu \rightarrow e + \nu_\mu + \tilde{\nu}_e$
Время жизни	$\tau = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$

Методы мюонной спиновой спектроскопии

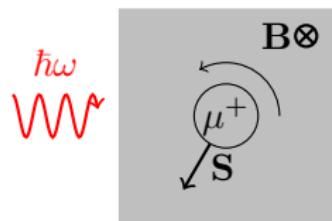


Общая схема

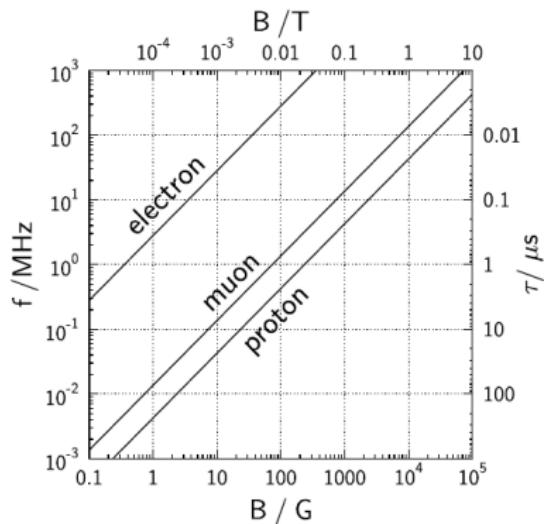
- ▶ Облучать образец мюонами
- ▶ Наблюдать за динамикой спина мюонов
- ▶ Делать выводы о магнитном поле в образце

μ SResonance

Образец



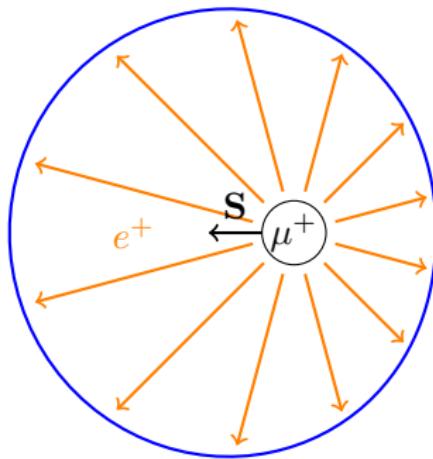
Резонанс во внешнем радиочастотном поле. Аналог электронного парамагнитного резонанса (EPR) и ядерного магнитного резонанса (NMR).



Частоты резонансов для электронов, мюонов и протонов, в зависимости от магнитного поля.

Исследуемая область образца ограничивается толщиной скин-слоя.

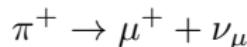
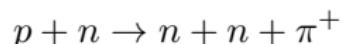
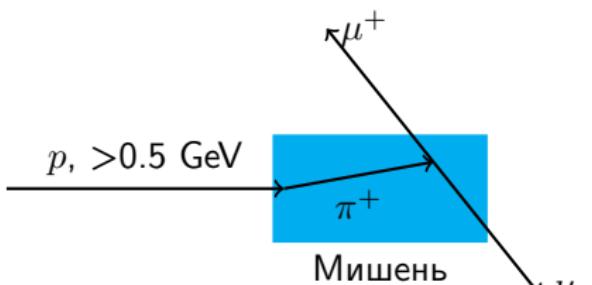
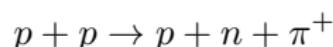
Нарушение закона сохранения четности



При распаде мюона импульс вылетающего позитрона направлен преимущественно вдоль направления спина распавшейся частицы.

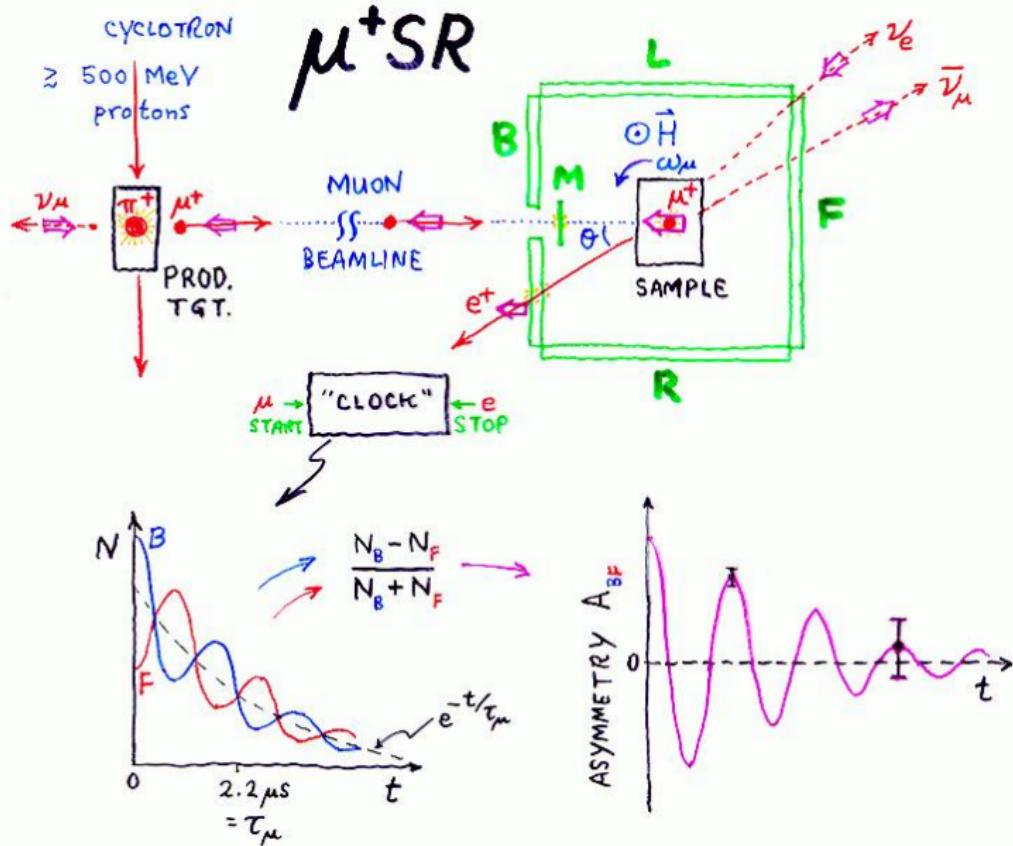
Генерация поляризованного пучка мюонов

Реакции



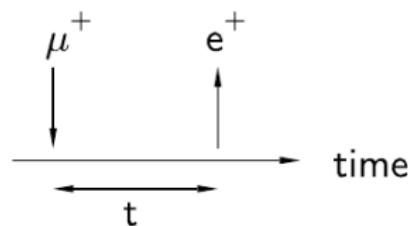
Спин мюонного нейтрино противоположен его импульсу. Следовательно, в системе покоя пи-мезона спин мюона также антипараллелен импульсу. Если пи-мезон остановился в мишени до распада, то однозначная связь импульса мюона со спином имеет место и в лабораторной системе отсчета.

μ SR Rotation

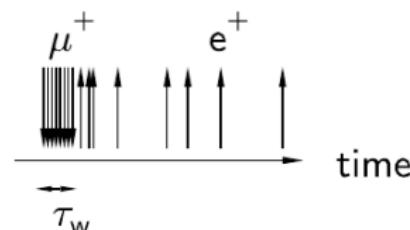


Режимы измерения

(a) CW



(b) Pulsed



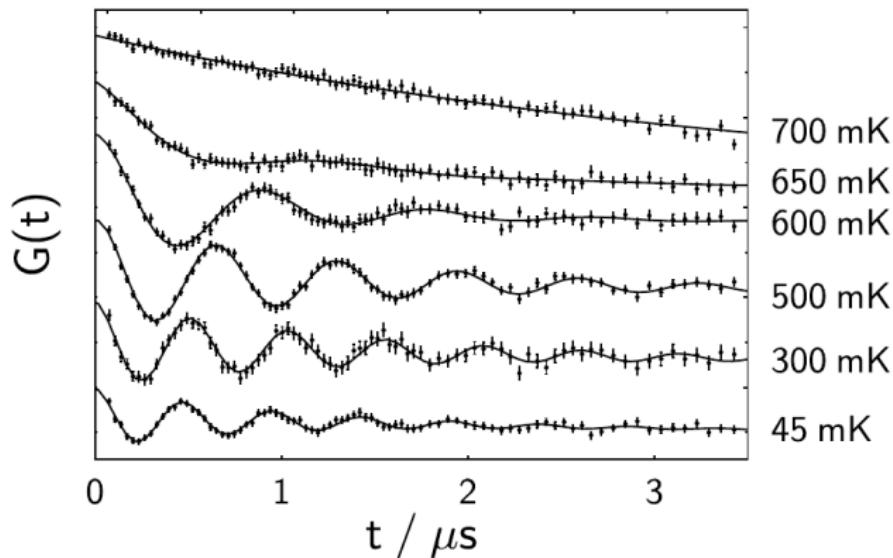
Непрерывный

Мюоны попадают в образец по одному, последующие мюоны блокируются пока не будет зарегистрирован позитрон.

Импульсный

Большая группа мюонов в течение короткого интервала времени попадает в образец. Регистрируются все появляющиеся позитроны.

Ферромагнитный переход



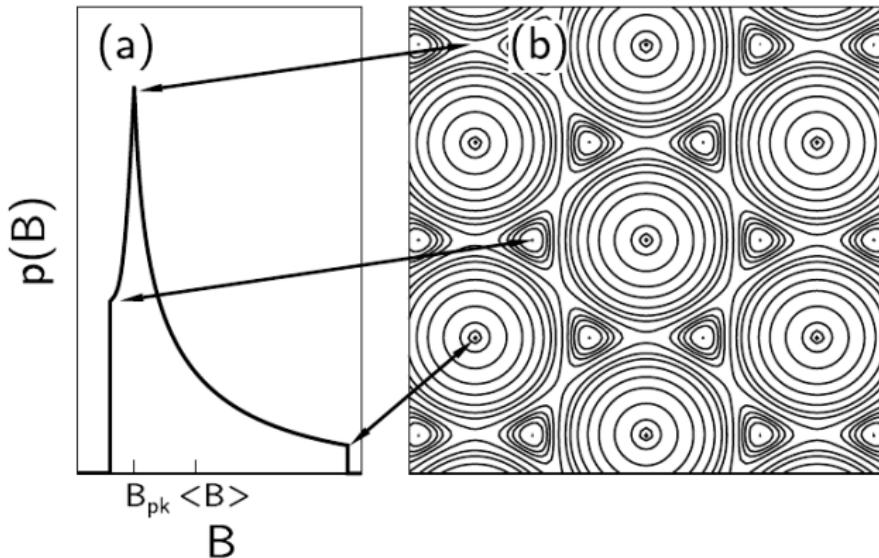
μSR в нулевом внешнем поле для органического ферромагнетика *p*-NPNN¹. Температура Кюри $T_K = 0.67\text{K}$.

Спектральные свойства сигнала

- ▶ Частота прецессии спина мюона ω пропорциональна магнитному полю в месте нахождения мюона $\omega = \gamma_\mu B(\mathbf{r})$.
- ▶ В случае неоднородного поля в сигнале присутствует много гармоник. В частности, неоднородность поля приводит к затуханию сигнала со временем.
- ▶ Выполнив преобразование Фурье от сигнала $G(t) \rightarrow G(\omega)$, можно найти плотность распределения магнитного поля $p(B) \propto G(\omega/\gamma_\mu)$. Плотность распределения поля определяется следующим образом

$$p(B) = \int \delta(B(\mathbf{r}) - B) \, d\mathbf{r} .$$

Исследование вихревой решетки в сверхпроводниках



Распределение полей в регулярной треугольной решетке вихрей. Скорость релаксации сигнала определяется дисперсией магнитного поля $\sigma = \sqrt{\langle B^2 \rangle - \langle B \rangle^2} \approx 0.0609\Phi_0/\lambda^2$. Зная $p(B)$, можно вычислить глубину проникновения магнитного поля λ .

Области применения μ SR

- ▶ Измерение магнитной восприимчивости
- ▶ Исследование материалов с магнитным порядком
- ▶ Исследование сверхпроводников
 - ▶ Измерение Лондоновской глубины λ , связанной с плотностью сверхпроводящих носителей тока
 - ▶ Обнаружение спонтанных магнитных полей в Sr_2RuO_4 ниже критической температуры²

Проблемы μ SR

- ▶ Диффузия мюонов
- ▶ Неупругие процессы
- ▶ Набег фазы на траектории полета мюона
- ▶ Флуктуации полей

²Luke, G. M, et. al., Nature 394, 558 (1998)

Источники

1. S. J. Blundell, Contemporary Physics **40**, 175–192 (2010)
2. E. H. Brandt, J. of Low Temp. Phys. **73**, 355 (1988)
3. Ю. М. Белоусов, В. П. Смилга, Sorosovskiy образовательный журнал **1**, 76 (1999)
4. <http://musr.org/intro/musr/intro.htm>