

Мюонная спиновая спектроскопия

Вадимов Василий

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

30 марта 2017 г.

μ SR rotation relaxation resonance

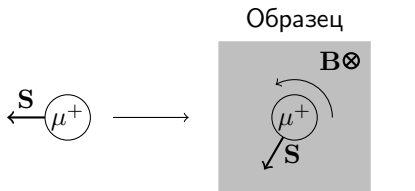
m s Applied*
u p Elementary
o i Particle
n n Physics

*(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	$\mu_\mu = 3.18\mu_p = 0.0048\mu_e$
Гиромагнитное 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	$\tau = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$

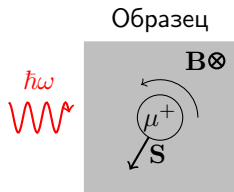
Методы мюонной спиновой спектроскопии



Прецессия спина мюона в магнитном поле.

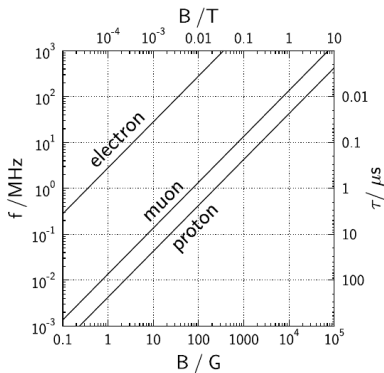
Общая схема

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



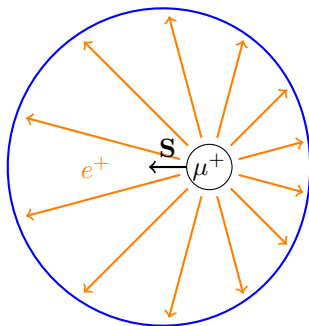
Резонанс во внешнем радиочастотном поле. Аналог электронного парамагнитного резонанса (EPR) и ядерного магнитного резонанса (NMR).

Исследуемая область образца ограничивается толщиной скин-слоя.



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

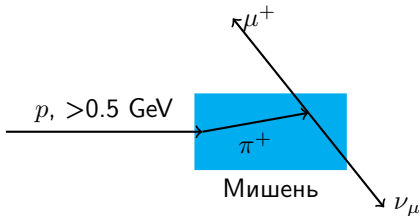
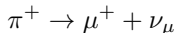
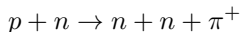
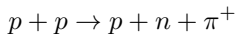
Нарушение закона сохранения четности



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

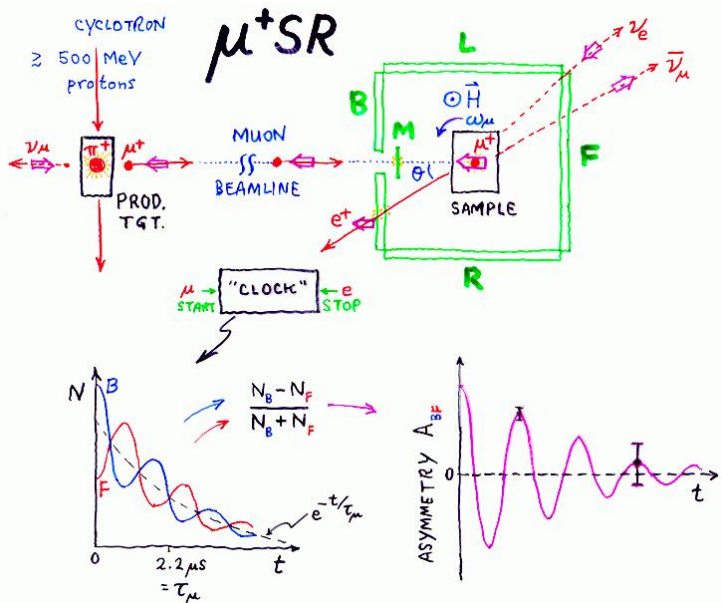
Генерация поляризованного пучка мюонов

Реакции



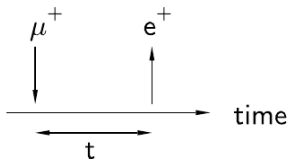
Спин мюонного нейтрино противоположен его импульсу. Следовательно, в системе покоя пи-мезона спин мюона также антипараллелен импульсу. Если пи-мезон остановился в мишени до распада, то однозначная связь импульса мюона со спином имеет место и в лабораторной системе отсчета.

μ SRotation



Режимы измерения

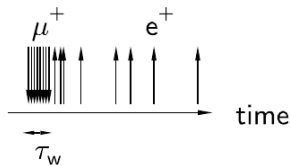
(a) CW



Непрерывный

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

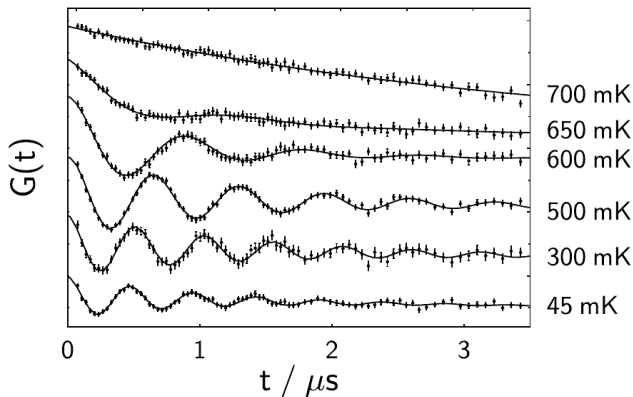
(b) Pulsed



Импульсный

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

Ферромагнитный переход



μ SR в нулевом внешнем поле для органического ферромагнетика *p*-NPNN¹. Температура Кюри $T_K = 0.67 K$.

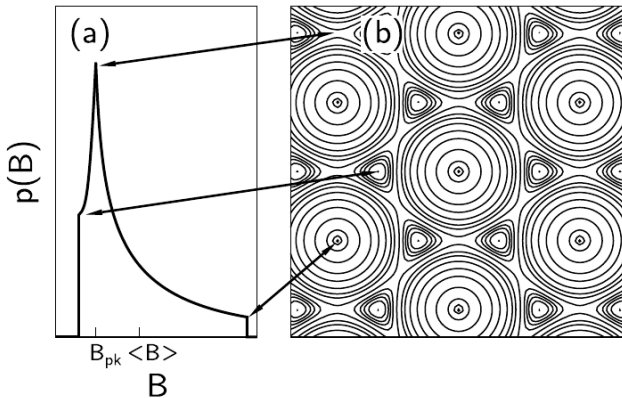
¹Blundell, S. J., et. al., Europhys. Lett., **31**, 573 (1995)

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, Соросовский образовательный журнал **1**, 76 (1999)
4. <http://musr.org/intro/musr/intro.htm>