

лографич. осей относительно H и от наличия у ядер решётки квадрупольного электрического моментов.

Мюоний (Mu). При торможении в веществе положит. мюоны, подхватывая электроны, образуют связанное состояние (μ^+e^-), подобное атому водорода. В большинстве веществ такой атом живёт слишком малое для регистрации время ($\sim 10^{-11}$ с), т. к. мюон быстро падает в окружение частиц со скомпенсиров. электронными спинами. Однако в нек-рых полупроводниках и диэлектриках атом Mu живёт достаточно долго и может быть обнаружен.

Осн. состояние мюония в общем случае является суперпозицией 4 состояний, отвечающих разл. комбинациям спинов электрона и мюона. Правила отбора по магн. квантовому числу приводят к тому, что в выражение $P(t)$ для поперечного магн. поля входят 4 частоты. Зависимость $P(t)$ упрощается, если внеш. поле H мало по сравнению с полем, создаваемым магн. моментом мюона на связанном электроне. В этом случае две частоты, близкие по величине частоте сверхтонкого расщепления ω_0 , определяемой плотностью волновой ф-ции электрона на мюоне в системе (μ^+e^-), обычно не детектируются (в вакууме $\omega_0 \approx 4463$ МГц). Оставшиеся 2 частоты могут быть зарегистрированы.

На рис. 3 показана т. н. двухчастотная прецессия спина мюона в кварце:

$$N(t) = N_0 \exp(-t/\tau_{\text{мю}}) [1 + aP(t)];$$

$$P(t) = \frac{1}{2} \exp(-t/\tau_{\text{мю}}) \cos \Omega t \cdot \cos \omega t.$$

Здесь $\tau_{\text{мю}}$ — ср. время жизни связанного состояния (μ^+e^-) в кварце ($\sim 1,5 \cdot 10^{-6}$ с), ω — частота ларморов-

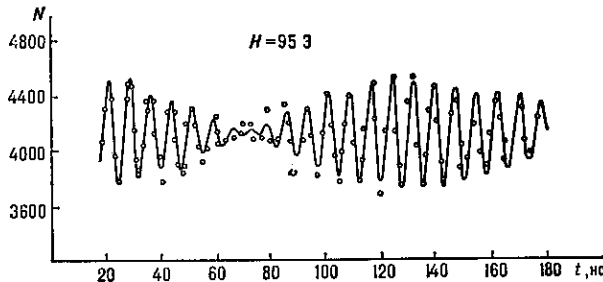


Рис. 3. «Двухчастотная» прецессия спина мюона в плавленном кварце.

ской прецессии мюония, $\Omega = \omega^2/\omega_0^2$. Измеренное в кварце значение ω_0 практически совпадает с величиной сверхтонкого расщепления для мюония в вакууме. Для мн. полупроводников ω_0 заметно отличается от вакуумного. В Ge и Si обнаружено по 2 типа связанных состояний (μ^+e^-).

Эксперименты при $H = 0$ и $H \parallel \sigma_u$. На рис. 4 показан вид зависимости $P(t)$, измеренной в сверхпроводящем состоянии сплава Nb_3Al при диполь-дипольном взаимодействии мюонов с ядрами решётки в отсутствие диффузии мюонов. Внеш. поле H в образце полностью отсутствует из-за *Мейснера эффекта*. Релаксация обусловлена взаимодействием мюонов с магн. моментами ядер кристаллич. решётки. Эксперим. зависимость описывается ф-цией Кубо — Тоябэ:

$$P(t) = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} (1 - \delta^2 t^2) \exp(-\delta^2 t^2 / 2),$$

при выводе к-рой предполагается гауссовский закон распределения внутр. магн. полей в местах локализации мюонов со среднеквадратичным отклонением $\sqrt{\langle \Delta H^2 \rangle}$:

$$\delta^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{e}{mc} \right)^2 \langle \Delta H^2 \rangle.$$

плавный выход на значение $1/3$ при $t \rightarrow \infty$ — объясняется прецессией спинов первоначально поляризованных мюонов в изотропных, постоянных во времени магн. полях, описываемых гауссовским распределением. Найденное в Nb_3Al значение величины δ соответствует среднеквадратичной величине поля на мюоне $\sqrt{\langle \Delta H^2 \rangle} = 8,2$ Э.

Метод нулевого поля используется для изучения медленных процессов изменения локальных полей на мюонах. Зависимость $P(t)$ в случае $H = 0$ более чувствительна к малым значениям τ , чем в случае $H \perp \sigma_u$, а также в тех случаях, когда возмущающее воздействие внеш. поля является фактором, разрушающим изучаемое явление.

До 1986 поля $H \parallel \sigma_u$ обычно использовались для того, чтобы замедлить и сделать наблюдаемыми процессы быстрой деполаризации мюонов за счёт взаимодействия с электронами среды. Дальнейшим развитием метода МСР послужили эксперименты по определению расщепления энергетических уровней мюона в веществе, напр. при взаимодействии с квадрупольными моментами ядер решётки (см. *Ядерный квадрупольный резонанс*). Когда энергия аземановского расщепления для мюона при увеличении H сравнивается с суммой аземановской энергии ядра и энергии квадрупольного расщепления, становится возможным взаимный переворот спинов мюона и ядра (*flip-flop*). При этом деполаризация резко ускоряется. Зависимость скорости релаксации Λ от внеш. поля H носит резонансный характер.

Технические средства. Метод МСР используется практически на всех ускорителях, имеющих пучки поляризов. мюонов низких энергий, в т. ч. на всех *мезонных фабриках*. Современная МСР-установка — автоматизиров. система, управляемая ЭВМ. Мюоны и позитроны регистрируются телескопами скintилляц. детекторов. Позитронных телескопов обычно два — вдоль и против хода пучка продольно-поляризов. мюонов. Логика идентификации мюонов и позитронов призвана выделять истинные события распада из стохастич. потоков мюонов пучка и позитронов при наличии фоновых частиц. Использование многонитяных *пропорциональных камер* для определения координат точки распада мюона позволяет исследовать неск. образцов одновременно и практически полностью подавить искажения МСР-спектров, возникающие из-за регистрации позитронов от распада мюонов, остановившихся вне исследуемого образца, и фона.

Наряду с регистрацией и кодированием времён жизни отд. мюонов, на пучках с импульсной структурой используется т. н. аналоговый съём информации. С детектора, регистрирующего интегральный спектр позитронов от всех мюонов одного импульса (обычно *черенковский счётчик*), снимается сигнал, форма к-рого кодируется и заносится в память ЭВМ. Итоговая гистограмма получается суммированием сигналов от отд. «пачек» мюонов (такой способ не накладывает ограничений на интенсивность пучков мюонов).

На импульсных пучках мюонов выполняются также стробоскопич. эксперименты и эксперименты в скрещенных магн. полях ($H_1 \perp \sigma_u$ и $H_2 \parallel \sigma_u$). Стробоскопич. способ основан на поиске резонанса в зависимости интегрального счёта позитронов от внеш. магн. поля. Резонанс наблюдается при совпадении частоты ларморовской прецессии спина мюона с частотой следования «пачек» мюонов. Эксперименты в скрещенных полях но-

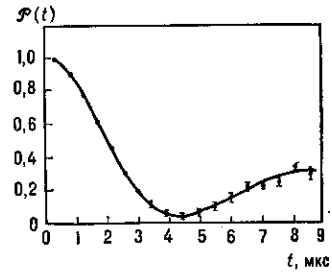


Рис. 4. Релаксация спина мюона в сверхпроводящем состоянии сплава Nb_3Al .