

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

14-87-431

**Ю.Ф.Киселев, А.Ф.Прудкогляд*, А.С.Шумовский,
В.И.Юкалов**

**ОБНАРУЖЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ
СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ СИСТЕМОЙ
ЯДЕРНЫХ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ**

Направлено в "Журнал экспериментальной
и теоретической физики"

* Институт физики высоких энергий, Протвино

1987

Введение

В 1953 г. Дикке ^{/1/} теоретически обобщил успешные опыты Гана ^{/2/} по созданию когерентных состояний в системе ядерных спинов на СВЧ-спектроскопии и оптику. Когерентность создавалась облучением вещества радиочастотным полем. Другой способ ^{/1/} самопроизвольной корреляции во времени пространственно разделённых излучателей - сверхизлучение (СИ) - был реализован в оптическом и инфракрасном диапазонах. СИ является нелинейным процессом генерации с интенсивностью, пропорциональной квадрату излучателей, и максимально возможной скоростью "высвечивания" заселённости. В последнее время в связи с развитием техники динамической поляризации ядер в конденсированных средах на метровых волнах при сверхнизких температурах удаётся достигнуть такой же величины больцмановского фактора kT , что и в СВЧ-спектроскопии при гелиевых температурах. Естественно возникает принципиальный вопрос о возможности спонтанного возникновения СИ магнитных диполей из состояния термодинамического равновесия с отрицательной спиновой температурой. В отличие от оптического и ИК-диапазонов вероятность спонтанного излучения на радиочастотах пренебрежимо мала, вследствие чего спонтанное излучение не может быть причиной возникновения СИ. По той же причине, в отличие от оптики, невозможно реализовать когерентное излучение на радиочастотах в безрезонаторной схеме. Тем не менее на метровых волнах можно не только вызвать самопроизвольное (без приложения $\pi/2$ -импульса) СИ, но и реализовать генерацию, отличающуюся от СИ-лазера лишь процессом создания инверсной заселённости. Действительно, как мы выяснили, при сильной связи ядерных спинов с пассивным резонансным контуром некогерентная мазерная генерация (МГ), играющая роль некогерентной спонтанной эмиссии в оптике, способна развить достаточную амплитуду поля в контуре для начала коррелированного во времени поворота полной намагниченности спиновой системы.

Энергетическую возможность такого процесса обосновали Бломберг и Паунд ^{/3/}. Файн ^{/4/} предложил назвать новый когерентный источник

радиоволн когерентом. В 1978 г. в работе ^{/5/} предпринята попытка вызвать СИ в системе ядер алюминия в рудине Al_2O_3 . Однако авторам ^{/5/} удалось получить только некогерентную МГ, которая в слабоусиливающих средах при невысокой поляризации ядер имеет интенсивность, намного превосходящую интенсивность когерентного СИ-процесса, что делает невозможным наблюдение последнего.

В данной работе показано, что увеличение поляризации протонов выше порога возникновения мазерной генерации приводит к возникновению когерентного СИ-процесса. Исследована зависимость МГ и СИ от степени поляризации ядер.

Постановка эксперимента по обнаружению радиочастотного сверхизлучения (РСИ)

В качестве активного вещества использовался диэлектрик с высокой концентрацией протонов - пропандиол ($C_3H_8O_2$) с парамагнитной примесью Ce^{+5} . Вещество в виде охлаждённых шариков диаметром 1 мм засыпалось в камеру растворения 3He в 4He и подмагничивалось постоянным полем $H_0 = 26,4$ кГс. Коэффициент заполнения равняется 0,6, концентрация спинов $n = 4,7 \cdot 10^{21}$ сп./см³. Эксперименты велись на двух низкотемпературных установках. На первой для измерения поляризации и получения СИ использовалась одна и та же двухвитковая катушка, погружённая в СВЧ-резонатор, полностью заполненный образцом, с объёмом 12 см³.

С помощью высокочастотного коаксиального кабеля, составляющего часть колебательного контура, катушка связывалась с системой измерения ядерной поляризации - Q-метром. СИ на этой установке наблюдалось на частоте 65 МГц в контуре, составленном из катушки, окружённой СВЧ-резонатором, и охлаждённой части коаксиального кабеля при отключённом Q-метре. В такой геометрии опыта удалось получить СИ-реверс знака поляризации. Все другие приведенные ниже экспериментальные данные получены на второй установке. На этой установке, для упрощения анализа экспериментальных данных, СИ наблюдалось в резонансном контуре, состоящем из 10-витковой катушки с площадью витка 2,7 см² и конденсатора 29 пФ. В охлаждённом состоянии резонансная частота контура равнялась 21,5 МГц, $Q = 580$. В катушку вставлялась тефлоновая камера растворения 3He в 4He с образцом объёмом 1 см³. После охлаждения до $T = 0,3$ К в резонатор подавалась СВЧ-мощность с частотой, на 120 МГц превышающей центральную частоту линии ЭПР иона Ce^{+5} (73 ГГц). При нерезонансном облучении линии ЭПР происходит процесс "динамического охлаждения" ^{/6/}, в результате которого ядерные спины получают высокую отрицательную

поляризацию. Из-за различных конструкций камер растворения максимальная поляризация на первой установке составляла $P = -0,9$, на второй — $P = -0,6$. После завершения поляризации источник СВЧ отключается, а камера растворения ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ охлаждается ниже 50 мК. В результате охлаждения вещества происходит резкое замедление процесса ядерной спин-решеточной релаксации и, следовательно, ядерная и электронная спиновые системы становятся практически несвязанными. Для примера укажем, что характерная величина времени продольной спин-решеточной релаксации ядер в зависимости от величины поля H_0 ($5 + 26,4$ кГц) составляет от 50 до 500 ч. СИ наблюдается в момент совпадения ларморовской частоты ядер с резонансной частотой контура при адиабатически медленном изменении H_0 . "Замороженная" намагниченность сохраняется до возникновения МГ или СИ и составляет для спина $I=1/2$ при $P=0,6$ величину

$$M = \frac{1}{2} n \gamma \hbar P = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Гс}, \quad (1)$$

где $\gamma = 4,257 \cdot 10^3$ Гц/Э — гиромагнитное отношение протонов, \hbar — постоянная Планка. Статическая ядерная восприимчивость образца равна $\chi_0 = M/H_0 = 1,5 \cdot 10^{-6}$ ($H_0 = 26,4$ кГц). Для гауссовой формы линии максимальная величина высокочастотной ядерной восприимчивости $\chi''(\nu_{max})$ равна ($P = 0,6$)

$$\chi''(\nu_{max}) = 0,55 \pi \chi_0 \nu_0 / \gamma \Delta H = 0,55 \pi M / \Delta H = 5,2 \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где $\Delta H = 13$ Э — ширина линии ЯМР на половине высоты.

При появлении на контуре высокочастотного напряжения специальное триггерное устройство вырабатывает стартовый импульс, запускающий анализатор, который работает в режиме цифрового осциллографа. Анализатор запоминает форму видеосигнала, являющегося огибающей формы радиочастотного импульса.

Экспериментальные результаты

При пересечении ларморовской частоты ядер с резонансной частотой контура первоначальная поляризация $P = -85\%$ самопроизвольно реверсируется. В зависимости от скорости прохождения через резонанс контура величина конечной поляризации составляла от $+12$ до $+50\%$. Это явление представляет собой СИ-реверс намагниченности под действием мощного радиочастотного импульса, генерируемого в пассивном контуре, возможно, и в стенках СВЧ-резонатора, ядерными спинами. Этот импульс можно непосредственно наблюдать на осциллографе. Исходное,

наиболее вероятное в статическом равновесии значение кооперативного числа $\zeta^{1/2}$ равно

$$\zeta = |\bar{m}| = \frac{1}{2} |n_+ - n_-| = \frac{1}{2} n |P|, \quad (3)$$

где n_+ , n_- — заселённости $+1/2$ - и $-1/2$ -подуровней. В результате реверса поляризации, как следует из (3), кооперативное число изменяется, что косвенно указывает на наличие также некогерентного излучения. Максимальная интенсивность \mathcal{J} , пропорциональная квадрату напряжения на контуре, в дикковском состоянии ($\zeta, m = 0$) должна содержать член

$$\mathcal{J} \sim (\zeta + m)(\zeta - m + 1) \sim \zeta^2 P^2, \quad (4)$$

пропорциональный квадрату P . Исследование зависимости МГ и СИ от P было предпринято на второй установке. В ходе экспериментов установлено, что при $-(39 \pm 45)\% < P < -9\%$, где нижняя граница зависит от скорости изменения поля, возникает только один импульс мазерной генерации с характерной широкой формой импульса, длительность которого достигает 0,3 с. Передний фронт этого импульса по мере роста модуля поляризации формируется в отдельный остроугольный СИ-импульс (рис.1).

Используя начальное значение $P = -0,09$, при котором возникает МГ, можно рассчитать фактор заполнения η катушки образцом:

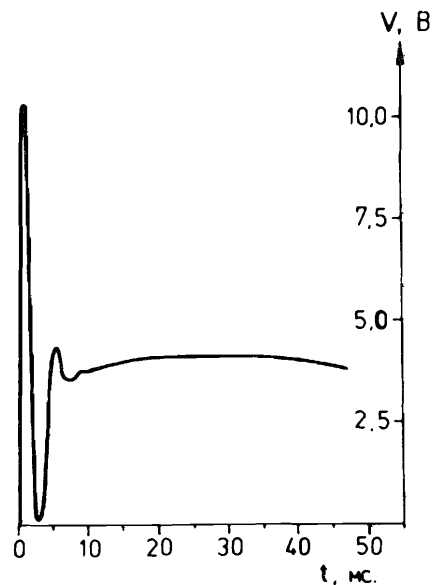


Рис. 1
Передний фронт протектированного напряжения МГ при отделении СИ-импульса (частота $21,5$ МГц, $|P| = 0,45$, $dH_0/dt = 100$ Э/с).

$$\gamma = [4\pi Q f''(v_{max})]^{-1} = 0,17, \quad (5)$$

где f'' получено из (2) при $Q = 580$. Величина γ хорошо совпадает с геометрическим фактором заполнения катушки. При дальнейшем росте P интенсивность СИ быстро нарастает, а начало МГ отодвигается по времени от СИ-импульса (рис.2). Модуляция поля H_0 полем звуковой частоты

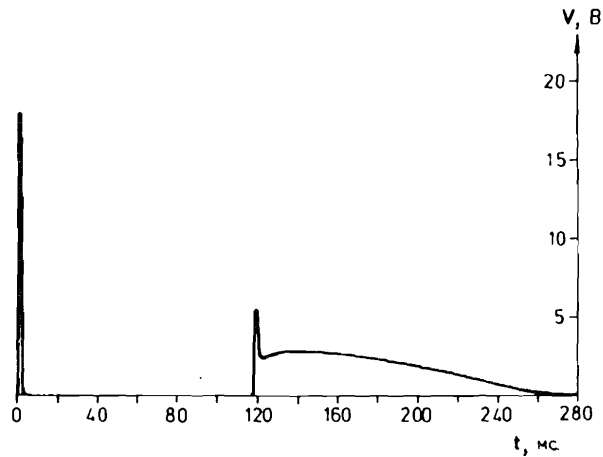


Рис. 2

Общий вид СИ (короткий) и МГ (длинный) импульсов.

(50 Гц) вызывает амплитудную модуляцию МГ-импульса с той же самой частотой (рис.3). При увеличении глубины модуляции процесс МГ можно многократно прерывать и возобновлять. Следовательно, "длинный" импульс (рис.2,3) действительно является некогерентным мазерным излучением (о чём свидетельствует также форма его импульса). Расчёт длительности МГ-импульса при известной скорости развёртки поля показывает, что в процессе МГ происходит "захват" резонансной частоты контура спиновой системой ¹³⁷. В результате длительность импульса может в несколько раз превосходить время прохождения полем линии ЯМР. В противоположность МГ СИ-импульс связан с коррелированным во времени поворотом намагниченности, в результате которого центральная часть $f''(v)$ реверсируется. Так как в процессе эксперимента поле H_0 не-

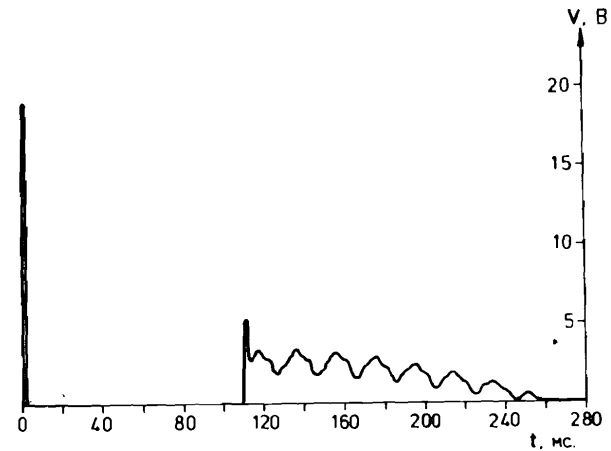


Рис. 3

Те же импульсы, что и на рис. 2, в условиях амплитудной модуляции поля H_0 с частотой 50 Гц.

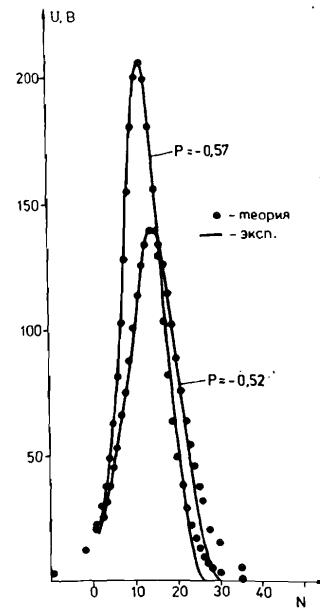


Рис. 4

$P = -0,52; -0,57$; экспериментальная и теоретическая форма протектированного напряжения СИ-импульса на колебательном контуре. $\sqrt{\quad}$ - каналы анализатора.

прерывно изменяется, то M^+ возникает на нереверсированном крыле с запаздыванием по времени относительно СИ-импульса. На рис. 4 в развёрнутом виде дана форма напряжения на катушке от СИ-импульса, которая в соответствии с теорией ¹⁷⁾ описывается зависимостью вида $Sech[(t-t_0)/\tau]$, где t_0 - время задержки, τ - время, характеризующее ширину импульса. Зная фактор заполнения, можно оценить постоянную времени радиационного затухания $\tau_R = (4\pi^2 \mu Q \eta)^{-1}$, равную 1 мкс при $\eta = 0,6$.

Если оценить T_2 по ширине гауссовой формы линии ΔH протонов в пропандиоле, равной 13 Э, то получается

$$T_2 = \frac{2\sqrt{\pi} \epsilon \eta \tau}{\gamma \Delta H} \approx 53 \text{ мкс.} \quad (6)$$

Следовательно, $\tau_R \ll T_2$. Постоянная времени колебательного контура $\tau_c = 2Q/2\pi\nu \approx 9 \text{ мкс} < T_2$. Расчёт по уравнениям Блоха для однородноугеренной формы линии предсказывает реверс поляризации, даже если выбрать $\tau_R = \tau_c = 9 \text{ мкс}$. Тем не менее ни в одном эксперименте с образцом объёмом 1 см³ получить реверс знака поляризации не удалось. Успешный реверс поляризации на установке с объёмом образца 12 см³ связан с более высоким значением $\eta = 0,6$, а также с возможным влиянием стенок СВЧ-резонатора, который локализует всю энергию излучения в объёме образца. Практическое достижение реверса на этой установке указывает на возможность получения РСИ и в сильно усиливающих средах.

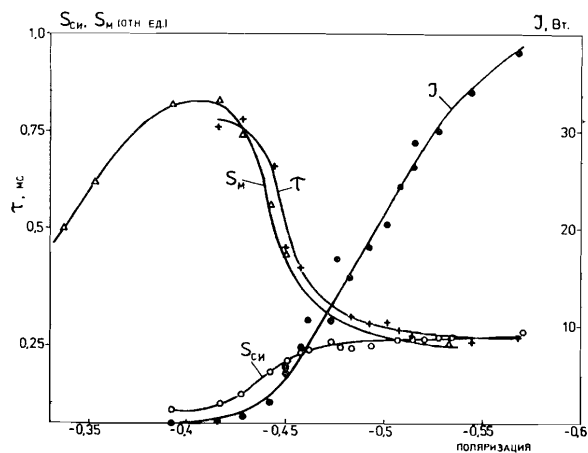


Рис. 5. Площадь M^+ (S_M), СИ (S_{CM})-импульсов, максимальная интенсивность (J), длительность СИ-импульса (τ) в зависимости от начальной поляризации ядер.

На рис. 5 представлены зависимости площади МГ (S_M)- и СИ (S_{CM})-излучений, максимальной интенсивности (J), ширины СИ-импульса (τ) от поляризации при скорости развёртки 200 Э/с. Видно, что возникновение СИ приводит к перераспределению энергии консервативной спиновой системы в пользу когерентного излучения, при этом τ быстро уменьшается. В соответствии с (4) максимальная интенсивность квадратично зависит от P на начальном участке характеристики. В целом зависимость аналогична рассмотренному в оптике случаю СИ в слабоусиливающей среде ¹⁷⁾. Для этого случая в оптике также характерно отсутствие реверса населённости, что объясняется частичной кооперацией некоторого эффективного числа излучателей (аналогично неоднородному уширению в нашем случае). Отметим также, что ширина СИ-импульса возрастает при уменьшении скорости развёртки поля. Эта зависимость связана либо с неоднородным характером уширения $f(\nu)$, которое может возникать из-за статического поля высокополяризованных электронных спинов, либо с зависимостью граничного значения поперечной намагниченности, с которого начинается СИ, от времени задержки t_0 . Однозначно установить причину затрудняет выбранная нами методика наблюдения, не позволяющая измерить t_0 .

Заключение

Впервые мы наблюдали явление РСИ в системе магнитных дипольных моментов. РСИ возбуждается некогерентной МГ, которая является исходной причиной возникновения поперечной намагниченности. Показано, что в зависимости от величин η и P можно реализовать радиочастотный аналог оптического СИ-лазера как для случая слабоусиливающей, так и сильноусиливающей активной среды. В последнем случае наблюдается РСИ-реверс отрицательной поляризации. В области сверхнизких температур РСИ может быть вызвано на частотах от нескольких сотен килогерц до сотен мегагерц, что представляет большой интерес для исследования спиновых систем и моделирования работы СИ-лазера.

В заключение авторы приносят глубокую благодарность сотрудникам группы Ковалёва А.И., совместно с которой на установке ОИЯИ был обнаружен СИ-реверс поляризации, а также Н.Н.Боголюбову (мл.), Д.М.Казаринову, В.Г.Барышевскому за полезные обсуждения и поддержку.

Литература

1. Dicke R.H. - Phys.Rev., 1954, 93, p. 99.
2. Hahn E.L. - Phys.Rev., 1950, 77, 297; 1950, 80, 580.
3. Bloembergen N., round R.V. - Phys.Rev., 1954, 92 (1), p.8.
4. Файн В.М. - УФН, 1958, т.64, с.273.

5. Bosiger P. et al. - *Phys.Rev.Lett.*, 1977, 38(1), p. 602.
6. W. de Boer. - *Dynamic Orientation of Nuclei at Low Temperature*, CERN '74-11, Geneva, May 13.
7. Андреев В.В., Емельянов В.И., Ильинский Ю.А. - УФН, т.131, (в.4), 1980, с.653.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 июня 1987 года.

Киселев Ю.Ф. и др.
Обнаружение явления сверхизлучения системой ядерных магнитных моментов

14-87-431

Обнаружено самопроизвольное образование дикковского, сверхизлучательного /СИ/ состояния в системе инверсно поляризованных протонных спинов с "замороженной" поляризацией. СИ наблюдается при совпадении ларморовской частоты с резонансной частотой пассивного колебательного контура. Исходной причиной возникновения СИ является некогерентная мазерная генерация спинами. При сверхнизких температурах частота СИ генератора может перестраиваться от нескольких сотен килогерц до сотен мегагерц. Исследована зависимость некогерентного и когерентного излучений от исходной поляризации. Показано, что в зависимости от фактора заполнения и поляризации ядер можно реализовать радиочастотный аналог оптического СИ-лазера как для слабоусиливающей, так и для сильноусиливающей активной среды. В последнем случае наблюдается СИ-реверс отрицательной поляризации.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем и Лаборатории теоретической физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Kiselav Yu.F. et al.
The Discovery of Superradiation Phenomenon Using the Nuclear Magnetic Momentum System

14-87-431

Spontaneous generation of the Dicke superradiation (SR) state has been found in the system of inversely polarized proton spins with "frozen" polarization. SR is observed at the moment when the Larmor frequency crosses the resonance frequency of the passive oscillatory circuit. SR arises from incoherent maser generation of spins. The frequency of a SR generator can be retuned from several hundreds of kilohertz to hundreds of Megahertz at very low temperatures. Dependence of incoherent and coherent radiation on the initial polarisation has been investigated. A ratio frequency analogue of the optical SR laser is shown to be possible both for weak-amplifying and for strong-amplifying active media, depending on the factor of filling and polarisation of nuclei. SR-reverse of negative polarisation is observed in the latter case.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems and the Laboratory of Theoretical Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987