

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

К441

P17-87-842

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

**ОБНАРУЖЕНИЕ СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ ДИККЕ
В СИСТЕМЕ ЯДЕРНЫХ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ**

Направлено в журнал "Modern Physics Letters B"

*Институт физики высоких энергий, Серпухов

ВВЕДЕНИЕ

В 1953 г. Дикке^{/1/} теоретически обобщил результаты^{/2/} Гана по созданию когерентных состояний в системе ядерных спинов на СВЧ-спектроскопию и оптику. Когерентность создавалась облучением вещества радиочастотным полем. Другой способ^{/1/} самопроизвольной корреляции во времени пространственно разделенных 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" заселенностей. В последнее время в связи с развитием техники динамической поляризации ядер в конденсированных средах на метровых волнах при сверхнизких температурах удается достигнуть такой же величины бoльцмановского фактора $\mu \text{H}/\text{K}$, 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 заселенности. 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 намагниченной спиновой системы.

Энергетическую возможность такого процесса обосновали Бломберген и Паунд^{/3/}. Файн^{/4/} предложил назвать новый когерентный источник радиоволн когетроном. В 1978 г. в работе^{/5/} предпринята попытка вызвать СИ в системе ядер алюминия в рубине 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 дан-

ной 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 Cr^{+V} . Вещество в виде охлажденных шариков диаметром 1 мм засыпалось в камеру растворения 3He в 4He и подмагничивалось постоянным полем $H_0 = 26,4$ кГс. Коэффициент заполнения 0,6, концентрация спинов $n = 3,8 \cdot 10^{22}$ сп/см³. Эксперименты велись на двух низкотемпературных установках. На первой для измерения поляризации и получения СИ использовалась одна и та же двухвитковая катушка, погруженная в СВЧ-резонатор, полностью заполненный образцом, с объемом 12 см³.

С помощью высокочастотного коаксиального кабеля катушка связывалась с системой измерения ядерной поляризации — Q-метром. СИ на этой установке наблюдалось на частоте 65 МГц в контуре, составленном из катушки, окруженной СВЧ-резонатором, и охлажденной части коаксиального кабеля при отключенном 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 охлажденном состоянии резонансная частота контура равнялась 21,5 МГц, Q = 580. В катушку вставлялась тefлоновая камера растворения 3He в 4He с образцом объемом 0,5 см³. После охлаждения до T = 0,3 К в резонатор подавалась СВЧ-мощность с частотой, на 120 МГц превышающей центральную частоту линии ЭПР иона Cr^{+V} (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 = -0,7. После завершения поляризации источник СВЧ отключается, а температура камеры растворения становится ниже 50 мК. В результате охлаждения вещества происходит резкое замедление процесса ядерной спин-решеточной релаксации, и, следовательно, ядерная и электронная спиновые системы становятся практически не связанными. Для примера укажем, что характерная величина времени продольной спин-решеточной релаксации ядер в зави-

симости от величины поля H_0 ($5 \div 26,4$ кГс) составляет от 50 до 500 часов. СИ наблюдается при пересечении 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

$$M = \frac{1}{2} \nu \hbar P = 0,32 \text{ Гс.} \quad (1)$$

где $\gamma = 4,257 \cdot 10^3$ Гц/Э — гиромагнитное отношение протонов, \hbar — постоянная Планка. Статическая ядерная восприимчивость образца равна $\chi_0 = M/H_0 = 1,2 \cdot 10^{-5}$ ($H_0 = 26,4$ кГс). Для гауссовой формы линии максимальная величина высокочастотной ядерной восприимчивости (P = 0,6):

$$\chi''(\nu_{\max}) = 0,47 \pi \chi_0 \nu_0 / \gamma \Delta H = 0,47 \pi M / \Delta H = 3,6 \cdot 10^{-2}. \quad (2)$$

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 = 0,85 самопроизвольно реверсируется. В зависимости от скорости прохождения через резонанс контура величина конечной поляризации составляла от 0,12 до 0,5. Это явление представляет собой СИ-реверс намагниченности под действием мощного радиочастотного импульса, генерируемого в пассивном контуре, возможно, и в стенах СВЧ-резонатора, ядерными спинами. Этот импульс можно непосредственно наблюдать на осциллографе. Исходное, наиболее вероятное в статистическом равновесии значение кооперативного числа $\bar{r}^{1/2}$ равно

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

где n_+ , n_- — заселенности +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 J, пропорциональная квадрату напряжения на контуре, в дикковском состоянии ($\bar{r}, \bar{m} = 0$) должна содержать член

$$J \sim (r + m)(r - m + 1) \sim n^2 P^2, \quad (4)$$

пропорциональный квадрату P . Исследование зависимости МГ и СИ от P было предпринято на второй установке. В ходе экспериментов установлено, что при $-(39:45)\% < P < -9\%$, 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 остроконечный СИ-импульс (рис.1). Используя начальное значение $P = -0,09$, при котором возникает МГ, можно рассчитать фактор заполнения η катушки образцом:

$$\eta \geq [4\pi Q |\chi''(\nu_{\max})|]^{-1} = 0,025, \quad (5)$$

где χ'' получено из (2) при $Q = 580$. Так как $\chi''(\nu_{\max}) = \pi \gamma \chi_0 H_0 T_2$, то формула (5) совпадает с условием возбуждения спинового генератора $\eta \geq [(2\pi)^2 \gamma Q M T_2]$. Величина η оказывается примерно в 8 раз меньше геометрического фактора 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 (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 чем свидетельствует также форма его импульса). Расчет длительности МГ импульса при известной скорости развертки поля показывает, что в процессе МГ происходит "захват" резонансной частоты контура спиновой системой^{3/}. В результате длительность импульса может в несколько раз

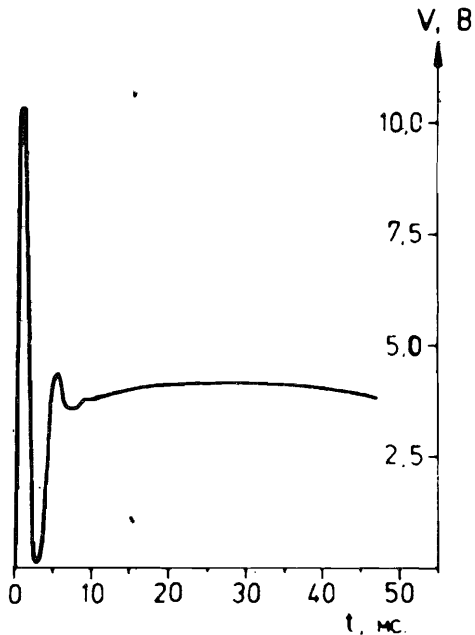


Рис.1. Передний фронт протектированного напряжения МГ при отделении СИ-импульса (частота 21,5 МГц, $|P| = 0,45$, $dH_0/dt = 100$ Э/с), V – амплитуда ВЧ-напряжения на контуре.

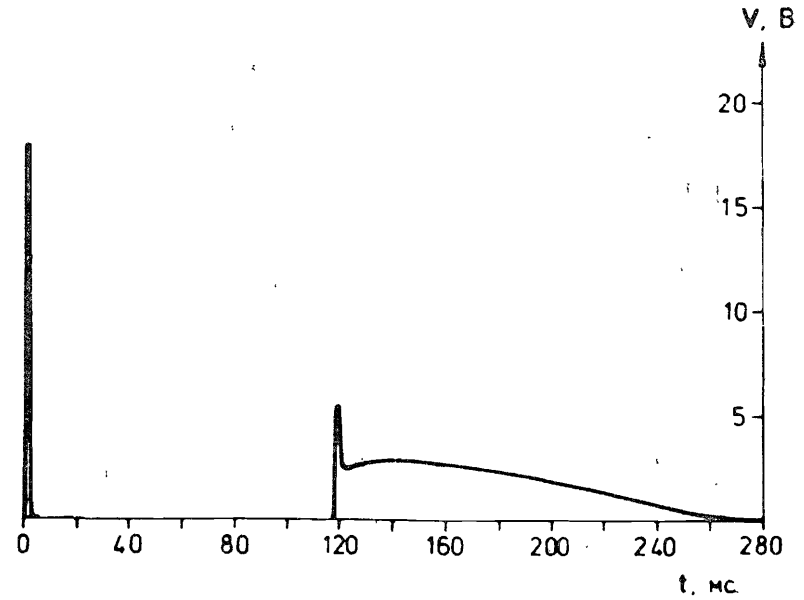


Рис.2. Общий вид СИ (короткий) и МГ (длинный)-импульсов.

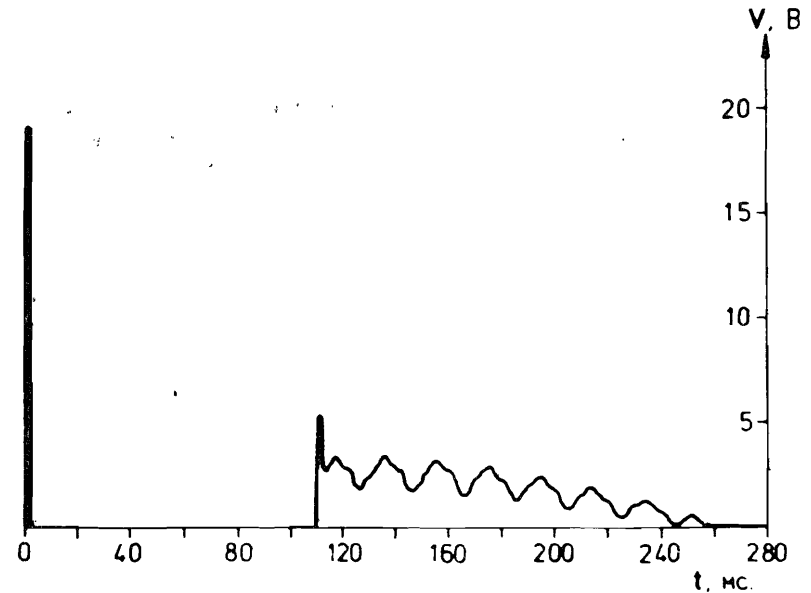


Рис.3. Те же импульсы, что и на рис.2, в условиях амплитудной модуляции поля H_0 с частотой 50 Гц.

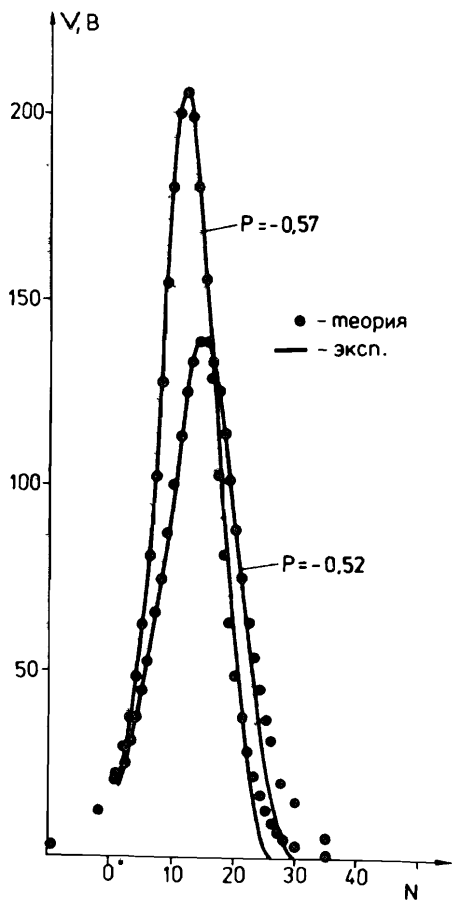


Рис.4. $|P| = 0,52; 0,57$, экспериментальная и теоретическая формы протектированного напряжения СИ-импульса на колебательном контуре. N – каналы анализатора. 20 мкс/к.

превосходить время прохождения полями линии ЯМР. В противоположность МГ СИ-импульс связан с коррелированным во времени поворотом намагниченности, в результате которого центральная часть χ'' реверсируется. Так как в процессе эксперимента поле H_0 непрерывно изменяется, то МГ возникает на нереверсированном крыле с запаздыванием по времени относительно СИ-импульса. На рис.4 в развернутом виде дана форма напряжения на катушке от СИ-импульса, которая в соответствии с теорией [7] описывается зависимостью вида $\text{sech}[(t - t_0)/\tau]$, где t_0 – время задержки, τ – время, характеризующее ширину импульса. Зная фактор заполнения, можно оценить постоянную времени радиационного затухания $\tau_R = (4\pi^2 \eta \text{MC} \gamma)^{-1}$, равную ~ 1 мкс при $|P| = 0,6$.

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

$$T_2 = \frac{\sqrt{\pi^{-1} \ln 2}}{\gamma \Delta H} = 8,5 \text{ мкс.} \quad (6)$$

Постоянная времени колебательного контура $\tau_k = 2Q/2\pi\nu \approx 9$ мкс. В дополнительном опыте $Q = 130$, $\tau_k = 2$ мкс, начальное значение $|P|$, при котором возникает МГ, возросло обратно пропорционально Q . Тем не менее ни при условии $\tau_R < T_2 \approx \tau_k$, ни при $\tau_k < \tau_R < T_2$ получить реверс поляризации с образцом объемом $0,5 \text{ см}^3$ не удалось. Следовательно, при сверхнизких температурах проявляется неоднород-

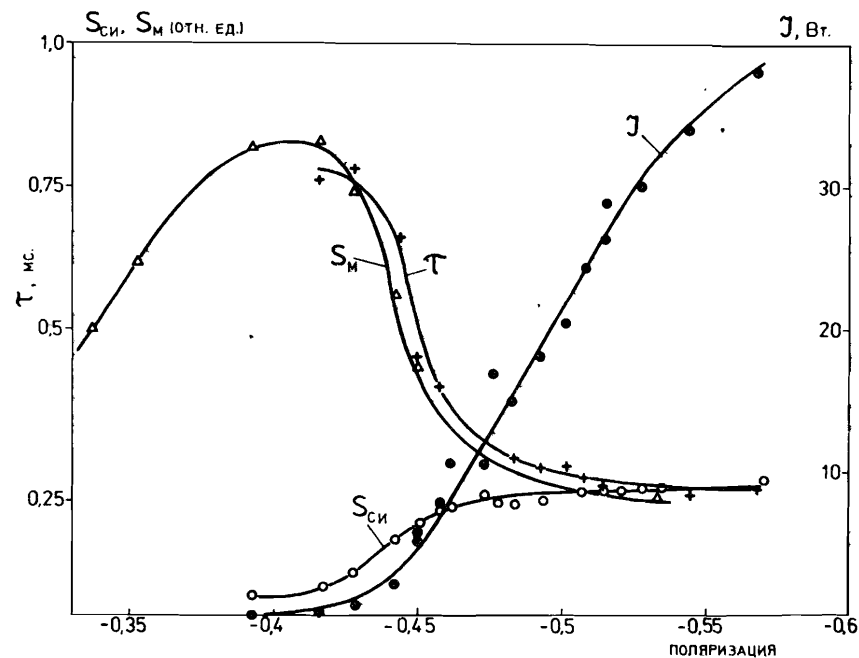


Рис.5. Площадь МГ (S_M), СИ ($S_{СИ}$)-импульсов, максимальная интенсивность (J), длительность СИ-импульса (τ) в зависимости от начальной поляризации ядер.

ное уширение линии ЯМР. Успешный реверс поляризации с образцом 12 см^3 мы объясняем увеличением интенсивности излучения образца большего объема. Практическое достижение реверса указывает на возможность получения РСИ в сильноусиливающих средах.

На рис.5 представлены зависимости площади МГ (S_M)- и СИ ($S_{СИ}$)-излучений, максимальной интенсивности (J), ширины СИ-импульса (τ) от поляризации при скорости развертки 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 [7]. Для этого случая в оптике также характерно отсутствие реверса населенностей, что объясняется частичной кооперацией некоторого эффективного числа излучений (аналогично неоднородному уширению в нашем случае). Отметим также, что ширина СИ-импульса возрастает при уменьшении скорости развертки поля. Эта зависимость связана либо с неоднородным характерным уширением

$\chi''(\nu)$, 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 .

В заключение авторы приносят глубокую благодарность сотрудникам группы А.И.Ковалева, совместно с которой на установке ОИЯИ был обнаружен СИ-реверс поляризации, а также Н.Н.Боголюбову (мл.), Ю.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, p.297; 1950, 80, 580.
3. Bloembergen N., Pound R.V. – *Phys.Rev.*, 1954, 95(1), p.8.
4. Файн В.М. – *УФН*, 1958, 64, с.273.
5. Bösiger P. et al. – *Phys.Rev. Lett.*, 1977, 38(1), p.602.
6. de Boer W. – *Dynamic Orientation of Nuclei at Low Temperature*, CERN, 74-11, Geneva, May 13, 1974.
7. Андреев В.В., Емельянов В.И., Ильинский Ю.А. – *УФН*, 131, в.4, 1980, с.653.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 ноября 1987 года.

Киселев Ю.Ф. и др.
Обнаружение сверхизлучения Дикке в системе ядерных магнитных моментов

P17-87-842

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 начальной поляризации. Показано, что в зависимости от фактора заполнения и поляризации ядер можно реализовать радиочастотный аналог оптического СИ-лазера, как для случая слабоусиливающей, так и сильноусиливающей активной среды. В последнем случае наблюдается СИ-реверс отрицательной поляризации.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод Т.Ю.Думбрайс

Kiselev J.F. et al.
Discovery of Dicke Superradiation by System of Nuclear Magnetic Moments

P17-87-842

Spontaneous generation of the Dicke superradiation (SR) state has been found in the system of inversely polarised proton spins with "frozen" polarisation. 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 radio 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 Theoretical Physics and at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987