Письма в ЖЭТФ, том 124, вып. 6, с. 480 – 486 © 2026 г. 25 сентября

ЯМР-свидетельство жидкостного поведения Томонаги–Латтинжера в минерале ледневите $Cu[PO_3(OH)] \cdot H_2O$

С. В. Журенко[+1)], *А. В. Ткачёв*[+], *К. С. Перваков*[+], *Ал. А. Гиппиус*[+], *А. А. Гиппиус*[+*]

[+] *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия*

[*] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 4 августа 2026 г.
После переработки 18 августа 2026 г.
Принята к публикации 19 августа 2026 г.

В данной работе сообщается об исследованиях минерала ледневита $Cu[PO_3(OH)] \cdot H_2O$ методом ядерного магнитного резонанса. Температурное поведение скорости ядерной спин-решеточной релаксации ($1/T_1$) демонстрирует признаки одномерного поведения, характерного для жидкости Томонаги–Латтинжера. В частности, в широком диапазоне температур оно согласуется с теоретическими предсказаниями для жидкости Томонаги–Латтинжера: $1/T_1T(T) \sim T^{(1/2K)-2}$, с параметром Латтинжера $K = 0.27(3)$ и отрицательным показателем степени – характерной чертой спиновой динамики жидкости Томонаги–Латтинжера. Данный результат представляет микроскопическое доказательство необычной квазиодномерной проводимости в минерале ледневит.

DOI: 10.7868/S3034576626090214

Введение. Одномерные (1D) коррелированные электронные системы не подчиняются стандартной модели Ферми-жидкости и, как предполагается, образуют жидкость Томонаги–Латтинжера (TLL), характеризующуюся разделением спина и заряда и универсальным степенным законом убывания корреляций. Свойства одномерной проводимости в первую очередь характерны для наноструктур, таких как атомные или молекулярные цепочки на изолирующих поверхностях (квантовые провода) [1], углеродные нанотрубки [2–5], полупроводниковые нанопроволоки [6–8] и тонкие пленки [9]. Напротив, объемные материалы, демонстрирующие одномерную проводимость, в основном представлены органическими солями с переносом заряда [10–14]. Неорганические объемные материалы, демонстрирующие одномерную проводимость, встречаются крайне редко, к ним относятся синяя бронза ($A_{0.30}MoO_3$ (A = K, Rb)) [15], пурпурная бронза $Li_{0.9}Mo_6O_{17}$ [16, 17], $NbSe_3$ и TaS_3 [18], $K_2Pt(CN)_4Br_{0.3} \cdot 3H_2O$ [19]. Признаки одномерной физики также встречаются в некоторых сверхпроводящих системах [20]. Однако теоретические модели, основанные на модели TLL, чаще применяются для анализа спиновой подсистемы в различных одномерных магнитных цепочках [21–25], включая холдейновские магнетики [26, 27], чем для изучения проводимости в этих соединениях. Поэтому поиск и исследование новых неорганических одномерных проводников является актуальной задачей современной физики конденсированного состояния.

Первоначальной целью данной работы был синтез легированного медью свинцового апатита $Pb_9Cu(PO_4)_6O$ и его подробное исследование методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на ядрах ^{31}P (ядерный спин $I = 1/2$) в качестве информативного локального зонда. Это соединение вызвало большой интерес в 2023 г. благодаря статье Lee [28], в которой сообщалось о возможной сверхпроводимости с критической температурой (T_c) $\sim$ 400 K при атмосферном давлении. К сожалению, этот эффект был опровергнут, а наблюдаемые явления были объяснены падением удельного сопротивления примеси $Cu_{2-x}SO_x$ [29] и наличием мягких ферромагнитных компонентов [30]. Ранее Ding с соавторами исследовали соединение $Pb_{10-x}Cu_x(PO_4)_6O$ методом ЯМР на ядрах ^{31}P, хотя сомневались в том, что медь вошла в кристаллическую структуру образца [31].

Неожиданно, воспроизведя метод синтеза из статьи Lee [28], мы получили несколько фаз, в том числе соответствующую минералу ледневит $Cu[PO_3(OH)] \cdot H_2O$, открытому группой Касаткина в 2023 г. [32], и это была единственная фаза в полученном продукте, содержащая фосфор. Ледневит является моногидратом гидрофосфата меди, структура которого состоит из тетраэдров $[PO_4]^{3-}$

[1)] e-mail: Zhurenko.Sergey@gmail.com

и октаэдров $[CuO_4(H_2O)_2]^{6-}$, связанных общими ребрами и образующих цепи вдоль оси c, имеет моноклинную сингонию и пространственную группу $P2_1/a$ со следующими параметрами элементарной ячейки: $a = 8.624(3)$ Å, $b = 6.345(2)$ Å, $c = 6.820(3)$ Å, $\alpha = \gamma = 90.00°$ и $\beta = 94.22°$ [32]. Кристаллическая структура ледневита представлена на рис. 1.

Упомянутые выше цепочки Cu–O являются возможными кандидатами для реализации квазиодномерной физики, включая транспортные и термодинамические свойства. Однако до настоящего времени не было опубликовано исследований физических свойств ледневита, за исключением единственной работы, посвященной изучению его кристаллической структуры [32]. Таким образом, $Cu[PO_3(OH)] \cdot H_2O$ представляет значительный интерес и требует всестороннего изучения на микроскопическом уровне, в частности, такими методами, как ЯМР-спектроскопия.

Экспериментальная часть.

Синтез и химическая характеризация. Так как методика Lee, описанная в работе [28], не соответствует стехиометрии заявленного продукта, мы решили провести синтез двумя методами – в соответствии с методикой, указанной в [28], без привязки к стехиометрии конечного продукта, и непосредственно с ориентацией на целевой состав, указанный в данной статье. Первый образец был синтезирован путем реакции смеси ланаркита Pb_2OSO_4 и фосфата меди (I) Cu_3P, взятых в мольном соотношении 1:1. Реагенты были смешаны, спрессованы в таблетки и помещены в трубки из кварцевого стекла. Трубки были вакуумированы, запаяны и выдержаны при температуре 925 °C в течение 10 ч; второй образец был синтезирован путем взаимодействия порошкообразных ортофосфата свинца (II) $Pb_3(PO_4)_2$ и оксида меди (II) CuO, взятых в мольном соотношении 1:1 и смешанных в вибрационной шаровой мельнице, остальные стадии были идентичны стадиям первого варианта синтеза. В результате первого варианта синтеза, являющегося воспроизведением корейского метода, мы получили несколько фаз – зеленую стекловидную и темно-серую порошкообразную массы. Полученная смесь была разделена, и отделенный темно-серый порошок был схож на продукт синтеза, описанный в работе [28]. В результате синтеза по второму методу мы получили такой же темно-серый порошок (далее – конечный продукт), но в иной пропорции относительно зеленой стекловидной массы.

Элементный анализ итогового продукта был выполнен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФС) при помощи универсального рентгенофлуоресцентного спектрометра Clever C-31 (ускоряющее напряжение 45 кВ, ток пучка 200 мкА). Анализ полученных зависимостей был выполнен при помощи программы “SmartXRF”.

Результат анализа методом РФС представлен на рис. 2. Содержание элементов составляет 49.36, 25.50, 22.42 и 2.72 ат. % для Cu, Pb, S и P соответственно.

Рентгенофазовый анализ (РФА) продуктов синтеза был выполнен при помощи рентгеновского дифрактометра Rigaku Miniflex 600 (излучение Co Kα, диапазон 2Θ от 10° до 80°). Анализ рентгенограмм был выполнен при помощи программы “Match!”. Результат РФА представлен на рис. 3. Основным результатом РФА является тот факт, что в полученной смеси представлена только одна фаза, содержащая фосфор, а именно, ледневит $Cu[PO_3(OH)] \cdot H_2O$.

Ядерный магнитный резонанс. Исследование методом ЯМР проводилось на ядрах ^{31}P в постоянном магнитном поле 5.5033 Тл с использованием метода спинового эха Хана. Благодаря относительно узкому распределению интенсивности вся резонансная линия возбуждалась на одной частоте без использования развертки. Спектры получали Фурье-преобразованием второй половины спинового эха. Скорость ядерной спин-решеточной релаксации измерялась методом восстановления после насыщения: интенсивность эха $I(\tau)$ измерялась при временной задержке τ после последовательности насыщающих импульсов. В качестве ЯМР-стандарта для ядер ^{31}P использовался 85 % водный раствор H_3PO_4 [33 ЯМР-свойства ядра ^{31}P].

Результаты и обсуждение. Во всем температурном диапазоне от 17 до 320 K ЯМР-спектр на ядрах ^{31}P представляет собой синглетную лоренцевую линию (рис. 4). Отрицательный химический сдвиг σ примерно -37 ppm относительно ларморовской частоты ^{31}P в пределах погрешности практически не изменяется с температурой. Ширина аппроксимирующей лоренцевой линии экспериментальных спектров слабо меняется с температурой, демонстрируя широкий минимум в диапазоне температур от 150 до 220 K, оставаясь в диапазоне от 9 до 11 кГц. Поскольку ядра ^{31}P со спином $I = 1/2$ не чувствительны к квадрупольным эффектам, наблюдаемое уширение имеет исключительно магнитную природу и может быть связано с неоднородностью распределения электронного спина в $Cu[PO_3(OH)] \cdot H_2O$.

Для изучения динамических свойств электронной подсистемы мы измерили скорость ядерной спин-решеточной релаксации (NSLR) ^{31}P в широком температурном диапазоне и представили результат в виде графика $1/T_1(T)$ на рис. 5. Кривые восстанов-

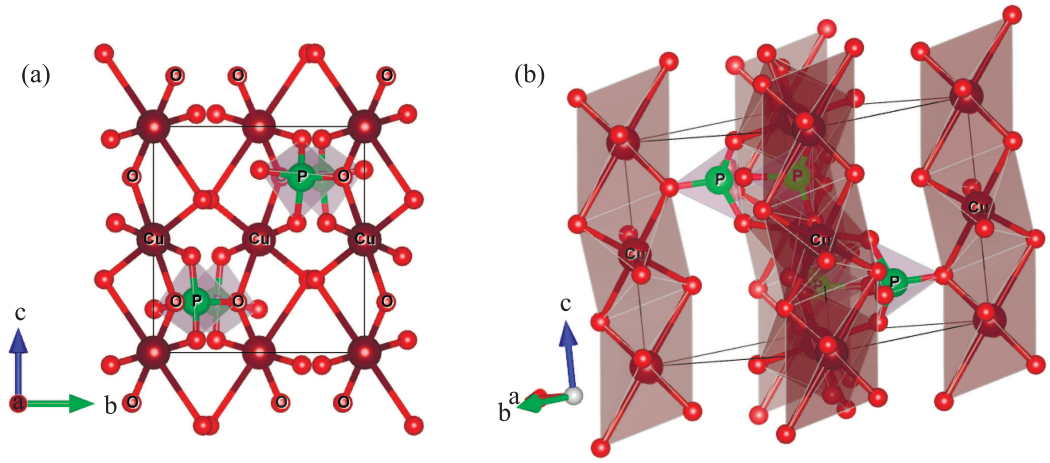

Рис. 1. (Цветной онлайн) Кристаллическая структура минерала ледневит $Cu[PO_3(OH)] \cdot H_2O$, пространственная группа $P2_1/a$: (a) – элементарная ячейка, вид вдоль оси a, показаны тетраэдры $[PO_4]^{3-}$; (b) – показаны цепи из октаэдров $[CuO_4(H_2O)_2]^{6-}$. Атомы меди показаны медно-коричневым цветом, атомы фосфора – зеленым, кислорода – красным

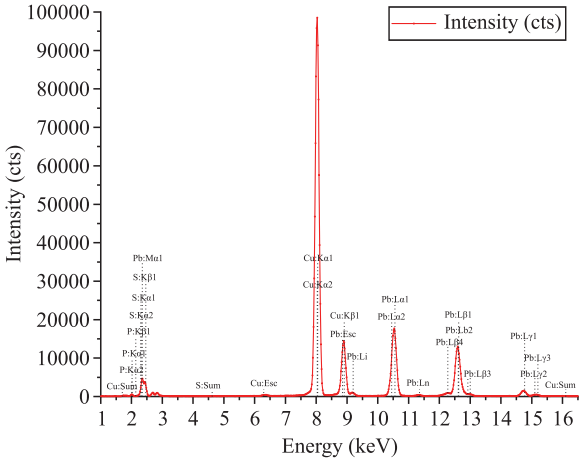

Рис. 2. (Цветной онлайн) Данные анализа конечного продукта синтеза методом РФС

ления $I(\tau)$ показали явное отклонение от простого экспоненциального закона (правая нижняя вставка на рис. 5, красная пунктирная линия), особенно выраженное при понижении температуры, напоминая растянутую экспоненту, описываемую уравнением:

$$I(\tau) = I_{\text{sat}}(1 - \exp[-(\tau/T_1)^{\beta}]), \qquad (1)$$

где I_{sat} – равновесная ядерная намагниченность, а β – так называемый коэффициент растяжения [34–36]. Действительно, аппроксимация уравнением (1) демонстрирует значительно лучшее согласие с экспериментом (синяя сплошная линия на правой нижней вставке рис. 5). Коэффициент растяжения $\beta < 1$ объясняется распределением скоростей релаксации и может рассматриваться как свидетельство некоторого внутреннего беспорядка в системе. Значение β увеличивается с температурой (левая верхняя вставка на рис. 5), проходя через широкий максимум в диапазоне 150–220 K, что согласуется с широким минимумом лоренцевской ширины линии в том же температурном диапазоне (вставка на рис. 4). Стоит отметить, что наблюдаемая скорость релаксации довольно высока для оксидных соединений, что указывает на существенную спиновую плотность на позиции фосфора в исследуемом образце и может свидетельствовать о выраженных проводящих свойствах.

Полученная зависимость $1/T_1T(T)$ демонстрирует слабый рост при понижении температуры, т.е. увеличение скорости спин-решеточной релаксации $1/T_1(T)$ с температурой происходит медленнее, чем линейно (см. рис. 6). Такое поведение исключает преобладающий механизм релаксации через фононы и указывает на наличие какого-то другого механизма релаксации. Более того, оно также отклоняется от обычного закона Корринги для трехмерных металлических проводников, $1/T_1T(T) = \text{const}$, что указывает на незначительную роль электронов проводимости или, по крайней мере, на некоторое усложнение этого механизма. Действительно, системы с сильно анизотропными транспортными свойствами могут проявлять свойства жидкости Томонаги–Латтинжера (TLL) [37]. Скорость ядерной спин-решеточной релаксации в в таких системах часто отклоняется от закона Корринги, и ее температурное поведение описывается как: $1/T_1T \sim \sim T^{(1/2K)-2}$, где K – параметр TLL [21]. В нашем эксперименте наблюдается степенной закон $1/T_1T \sim \sim T^{-(0.18\pm0.03)}$ в диапазоне температур почти в од-

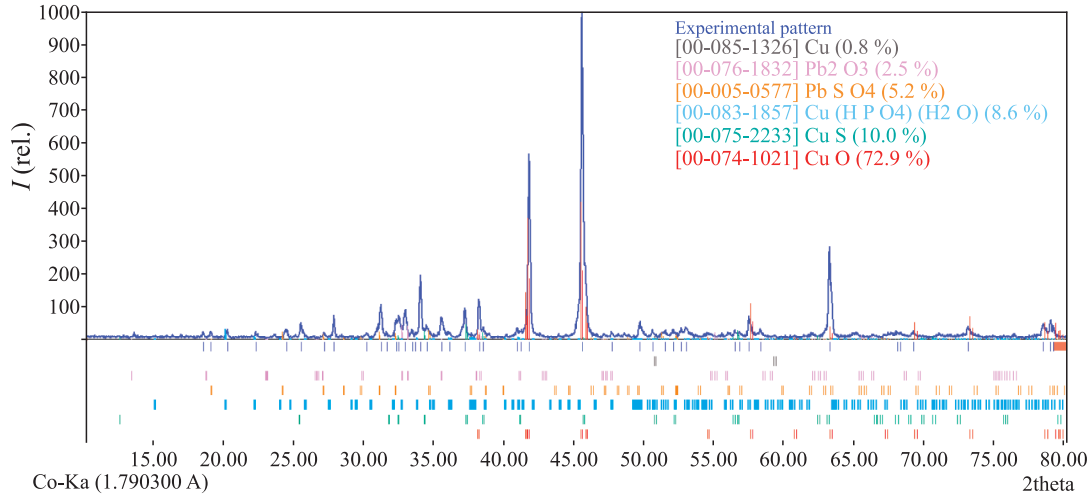

Рис. 3. (Цветной онлайн) Данные РФА конечного продукта синтеза: рентгенограмма образца (синяя линия) и штрих-диаграммы компонентов смеси (из базы данных PDF-2). Штрих-диаграмма ледневита представлена голубым цветом. Наиболее интенсивные пики ледневита представлены в районах $2\Theta \approx 20.3°$, $22.3°$ и $27.9°$. Коды представленных штрих-диаграмм указаны в легенде на рисунке

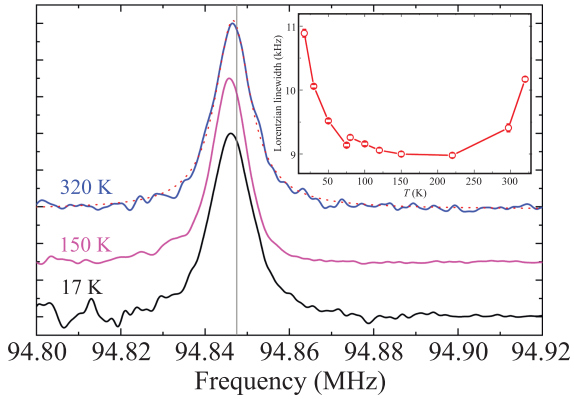

Рис. 4. (Цветной онлайн) ЯМР-спектры на ядрах ^{31}P $Cu[PO_3(OH)]\cdot H_2O$, измеренные при температурах 320, 150 и 17 K. Красная пунктирная линия – аппроксимация экспериментального спектра при температуре 320 K лоренцевой функцией. Серая вертикальная линия – ларморовская частота ядер ^{31}P в магнитном поле 5.5033 Тл, определенная путем измерения спектра ЯМР-стандарта. Вставка: температурная зависимость ширины ЯМР-линии ^{31}P из аппроксимации экспериментальных кривых лоренцевой функцией

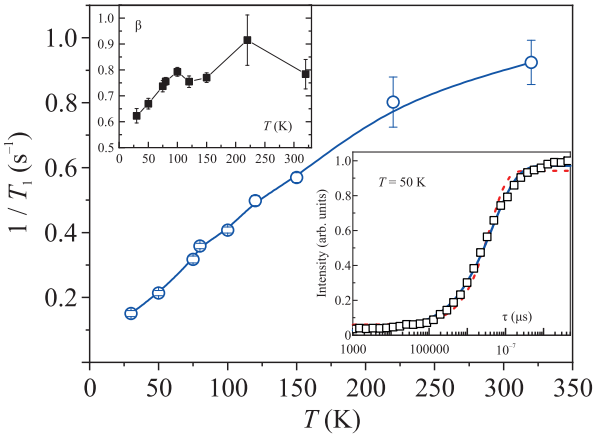

Рис. 5. (Цветной онлайн) Температурная зависимость $1/T_1$ на ядрах ^{31}P в $Cu[PO_3(OH)]\cdot H_2O$. Вставка слева вверху: коэффициент растяжения β как функция температуры. Вставка справа внизу: типичная кривая восстановления ядерной релаксации, полученная при 50 K (черные квадраты), в сравнении с простой экспоненциальной аппроксимацией (пунктирная красная линия) и аппроксимацией, растянутой экспонентой (сплошная синяя линия)

ну декаду ~ 30–220 K, что характерно для состояния TLL. Из линейной аппроксимации экспериментальных данных $1/T_1T(T)$, построенных в двойном логарифмическом масштабе (красная сплошная линия на рис. 6), получено значение $K = 0.27(3)$. Оно кажется вполне реалистичным, поскольку это значение очень близко к значению $K = 0.23$, полученному Horvatic с соавторами для данных $1/T_1(T)$ в квазиодномерной спиновой системе $BaCo_2V_2O_8$ [21], хотя и заметно ниже, чем $K = 0.37$, полученное Ihara из измерений ЯМР ^{13}C на однослойных углеродных нанотрубках [3]. Стоит отметить, что в работе [3] для анализа данных релаксации также использовалась модель растянутой экспоненты (уравнение (1)).

Заключение. В данной работе мы показали, что минерал ледневит $Cu[PO_3(OH)]\cdot H_2O$ может быть синтезирован с помощью обычного твердофазного синтеза, по крайней мере, в виде примесной фазы,

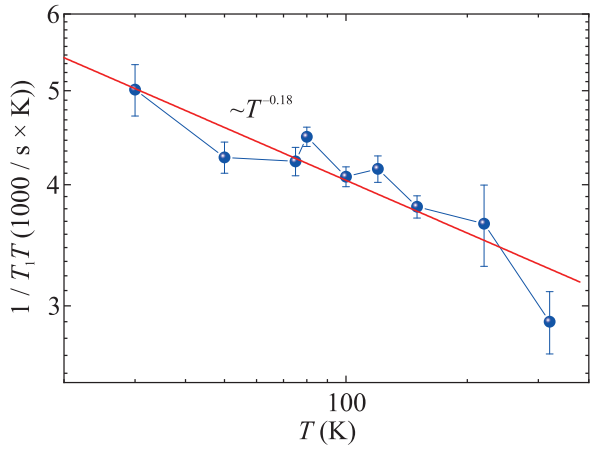

Рис. 6. (Цветной онлайн) Температурная зависимость $1/T_1T$ для ^{31}P в двойном логарифмическом масштабе (синие сферы) и ее аппроксимация степенным законом $1/T_1T(T) \sim T^{-0.18}$ (красная линия)

что может послужить стимулом для поиска путей оптимизации метода синтеза данного соединения.

Минерал ледневит впервые исследован методом ЯМР ^{31}P. Спектры ЯМР описываются одиночной функцией Лоренца, ширина линии которой слабо меняется с температурой и составляет от 9 до 11 кГц. Поскольку ядра ^{31}P характеризуются ядерным спином $I = 1/2$ и нулевым квадрупольным моментом, наблюдаемое уширение обусловлено исключительно магнитной природой и указывает на неоднородность распределения электронного спина в исследуемом образце. Данный вывод подтверждается кривой восстановления ядерной намагниченности, описываемой растянутой экспонентой.

Скорость ядерной спин-решеточной релаксации указывает на одномерное поведение, характерное для жидкости Томонаги–Латтинжера. Было показано, что во всем исследованном диапазоне температурная зависимость скорости релаксации согласуется с теоретическими предсказаниями для TLL: $1/T_1T(T) \sim T^{(1/2K)-2}$, с параметром Латтинжера $K = 0.27(3)$ и отрицательным показателем степени. Это характерно для спиновой динамики TLL. Данные результаты предоставляют микроскопическое свидетельство квазиодномерной проводимости в минерале ледневит.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. C. Blumenstein, J. Schäfer, S. Mietke, S. Meyer, A. Dollinger, M. Lochner, X. Y. Cui, L. Patthey, R. Matzdorf, and R. Claessen, "Atomically Controlled Quantum Chains Hosting a Tomonaga–Luttinger Liquid", Nat. Phys. **7**, 776 (2011); doi:10.1038/nphys2051.
2. H. Ishii, H. Kataura, H. Shiozawa, H. Yoshioka, H. Otsubo, Y. Takayama, T. Miyahara, S. Suzuki, Y. Achiba, M. Nakatake, T. Narimura, M. Higashiguchi, K. Shimada, H. Namatame, and M. Taniguchi, "Direct Observation of Tomonaga–Luttinger-Liquid State in Carbon Nanotubes at Low Temperatures", Nature **426**, 540 (2003); doi:10.1038/nature02074.
3. Y. Ihara, P. Wzietek, H. Alloul, M. H. Rümmeli, Th. Pichler, and F. Simon, "Incidence of the Tomonaga-Luttinger Liquid State on the NMR Spin-Lattice Relaxation in Carbon Nanotubes", EPL **90**, 17004 (2010); doi:10.1209/0295-5075/90/17004.
4. A .Kiss, A .Pályi, Y. Ihara, P. Wzietek, P. Simon, H. Alloul, V. Zólyomi, J. Koltai, J. Kürti, B. Dóra, and F. Simon, "Enhanced NMR Relaxation of Tomonaga-Luttinger Liquids and the Magnitude of the Carbon Hyperfine Coupling in Single-Wall Carbon Nanotubes", Phys. Rev. Lett. **107**, 187204 (2011); doi:10.1103/PhysRevLett.107.187204.
5. H. Yoshioka, "NMR Relaxation Rate in Metallic Carbon Nanotubes", J. Phys. Chem. Solids **63**, 1281 (2002); doi:10.1016/S0022-3697(02)00075-6.
6. S. V. Zaitsev-Zotov, Y. A. Kumzerov, Y. A. Firsov, and P. Monceau, "Luttinger-Liquid-like Transport in Long InSb Nanowires", J. Phys.: Condens. Matter **12**, L303 (2000); doi:10.1088/0953-8984/12/20/101.
7. Y. Ohtsubo, J.-i. Kishi, K. Hagiwara, P. Le Févre Patrick, F. Bertran, A. Taleb-Ibrahimi, H. Yamane, Sh.-i. Ideta, M. Matsunami, K. Tanaka, and Sh.-i. Kimura, "Surface Tomonaga–Luttinger-Liquid State on Bi/InSb (001)", Phys. Rev. Lett. **115**, 256404 (2015); doi:10.1103/PhysRevLett.115.256404.
8. L. Rui, L. Minyinan, D. Wenjun, Y. Wentao, Ch. Xiaoyang, T. Ran, D. Shuyue, Sh. Xiaoping, Y. Yajun, C. Ping, X. Haichao, P. Rui, Z. Tong, Zh. Zhenyu, and F. Donglai, "Electronic Structure and Signature of Tomonaga–Luttinger Liquid State in Epitaxial $CoSb_{1-x}$ Nanoribbons", npj Quantum Mater. **6**, 79 (2021); doi:10.1038/s41535-021-00381-y.
9. H. Zhang, Q. Zou, and L. Li, "Tomonaga–Luttinger Liquid in the Topological Edge Channel of Multilayer FeSe", Nano Lett. **21**, 6253 (2021); doi:10.1021/acs.nanolett.1c02069.
10. F. Zwick, D. Jérome, G. Margaritondo, M. Onellion, J. Voit, and M. Grioni, "Band Mapping and Quasiparticle Suppression in the One–Dimensional

Organic Conductor TTF-TCNQ", Phys. Rev. Lett. **81**, 2974 (1998); doi:10.1103/PhysRevLett.81.2974.

11. A. Schwartz, M. Dressel, G. Grüner, V. Vescoli, L. Degiorgi, and T. Giamarchi, "On-Chain Electrodynamics of Metallic $(TMTSF)_2X$ Salts: Observation of Tomonaga-Luttinger Liquid Response", Phys. Rev. B **58**, 1261 (1998); doi:10.1103/PhysRevB.58.1261.
12. S. Moayedpour, I. Bier, W. Wen, D. Dardzinski, O. Isayev, and N. Marom, "Structure Prediction of Epitaxial Organic Interfaces with Ogre, Demonstrated for Tetracyanoquinodimethane (TCNQ) on Tetrathiafulvalene (TTF)", J. Phys. Chem. C **127**, 10398 (2023); doi:10.1021/acs.jpcc.3c02384.
13. B. Korin-Hamzić, E. Tafra, M. Basletić, A. Hamzić, and M. Dressel, "Conduction Anisotropy and Hall Effect in the Organic Conductor $(TMTTF)_2AsF_6$: Evidence for Luttinger Liquid Behavior and Charge Ordering", Phys. Rev. B **73**, 115102 (2006); doi:10.1103/PhysRevB.73.115102.
14. M. Wakizaka, K. Ishiguro, T. Yoshida, H. Iguchi, T. Tsumuraya, H. Ito, M. Yamashita, and S. Takaishi, "Double Core–Shell Semiconducting Molecular Chain Halogen-Bridged Metal Complexes with Ohmic Contact Heterojunctions", ACS Appl. Mater. Interfaces **17**, 14322 (2025); doi:10.1021/acsami.4c22128.
15. M. H. Whangbo and L. F. Schneemeyer, "Band Electronic Structure of the Molybdenum Blue Bronze $A_{0.30}MoO_3$ (A = K, Rb), Inorg. Chem. **25**, 2424 (1986); doi:10.1021/ic00234a028.
16. P. Chudzinski, T. Jarlborg, and T. Giamarchi, "Luttinger-Liquid Theory of Purple Bronze $Li_{0.9}Mo_6O_{17}$ in the Charge Regime", Phys. Rev. B **86**, 075147 (2012); doi:10.1103/PhysRevB.86.075147.
17. G. Wu, X. Ye, X. Zeng, B. Wu, and W. G. Clark, "Investigation of the Magnetic Dipole Field at the Atomic Scale in Quasi-One-Dimensional Paramagnetic Conductor $Li_{0.9}Mo_6O_{17}$", J. Phys.: Condens. Matter **28**, 015003 (2016); doi:10.1088/0953-8984/28/1/015003.
18. S. N. Artemenko and S. V. Remizov, "Low-Temperature Conductivity of Quasi-One-Dimensional Conductors: Luttinger Liquid Stabilized by Impurities", Phys. Rev. B **72**, 125118 (2005); doi:10.1103/PhysRevB.72.125118.
19. W. H.-G. Müller, H. Niedoba, and D. Jérome, "NMR Study of the Quasi One Dimensional Conductor $K_2Pt(CN)_4Br_{0.3}\,3H_2O$ under Pressure", Solid State Commun. **16**, 655 (1975); doi:10.1016/0038-1098(75)90445-7.
20. H. Z. Zhi, T. Imai, F. L. Ning, J.-K. Bao, and G.-H. Cao, "NMR Investigation of the Quasi-One-Dimensional Superconductor $K_2Cr_3As_3$", Phys. Rev. Lett. **114**, 147004 (2015); doi:10.1103/PhysRevLett.114.147004.
21. M. Horvatić, M. Klanjšek, and E. Orignac, "Direct Determination of the Tomonaga-Luttinger Parameter K in Quasi-One-Dimensional Spin Systems", Phys. Rev. B **101**, 220406 (2020); doi:10.1103/PhysRevB.101.220406.
22. S. K. Channarayappa, S. Kumar, N. S. Vidhyadhiraja, S. Pujari, M. P. Saravanan, A. Sebastian, E. S. Choi, S. Chikara, D. Nambi, A. Suresh, S. Lal, and D. Jaiswal-Nagar, "Tomonaga–Luttinger Liquid and Quantum Criticality in Spin-$\frac{1}{2}$ Antiferromagnetic Heisenberg Chain $C_{14}H_{18}CuN_4O_{10}$ via Wilson Ratio", PNAS Nexus **3**, pgae363, (2024); doi:10.1093/pnasnexus/pgae363.
23. E. G. Sergeicheva, S. S. Sosin, L. A. Prozorova, G. D. Gu, and I. A. Zaliznyak, "Unusual Magnetic Excitations in the Weakly Ordered Spin-$\frac{1}{2}$ Chain Antiferromagnet Sr_2CuO_3: Possible Evidence for Goldstone Magnon Coupled with the Amplitude Mode", Phys. Rev. B **95**, 020411 (2017); doi:10.1103/PhysRevB.95.020411.
24. G. Müller and R. E. Shrock, "Dynamic Correlation Functions for One-Dimensional Quantum-Spin Systems: New Results Based on a Rigorous Approach", Phys. Rev. B **29**, 288 (1984); doi:10.1103/PhysRevB.29.288.
25. J. P. Groen, T. O. Klaassen, N. J. Poulis, G. Müller, H. Thomas, and H. Beck, "Dynamics of the $s = 1/2$ Linear Heisenberg Antiferromagnet in a Magnetic Field: Experiment and Theory", Phys. Rev. B **22**, 5369 (1980); doi:10.1103/PhysRevB.22.5369.
26. R. M. Konik and P. Fendley, "Haldane-Gapped Spin Chains as Luttinger Liquids: Correlation Functions at Finite Field", Phys. Rev. B **66**, 144416, (2002); doi:10.1103/PhysRevB.66.144416.
27. I. Jakovac, M. S. Grbić, M. Dupont, N. Laflorencie, S. Capponi, Y. Hosokoshi, S. Krämer, Y. Skourski, S. L. M. Takigawa, and M. Horvatić, "Magnetic Field-Induced Phases in a Model $S = 1$ Haldane Chain System", arXiv:2601.10489 (2026).
28. S. Lee, J .Kim, S. Im, S. An, Y.-W. Kwon, and K. H. Auh, "Consideration for the Development of Room-Temperature Ambient-Pressure Superconductor (LK-99)", Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology **33**, 61 (2023); doi:10.6111/JKCGCT.2023.33.2.061.
29. P. K. Jain, "Superionic Phase Transition of Copper(I) Sulfide and Its Implication for Purported Superconductivity of LK-99", J. Phys. Chem. C **127**, 18253 (2023); doi:10.1021/acs.jpcc.3c05684.
30. K. Guo, Y. Li, and S. Jia, "Ferromagnetic Half Levitation of LK-99-like Synthetic Samples", Sci. China Phys. Mech. Astron. **66**, 107411 (2023); doi:10.1007/s11433-023-2201-9.
31. Q.-P. Ding, Y. Sun, Q. Hou, W. Wei, X. Zhou, X. Wang, Z. Shi, and Y. Furukawa, "Microscopic Characterization of $Pb_{10-x}Cu_x(PO_4)_6O$ by ^{31}P and $^{63/65}Cu$ NMR Measurements", J. Compos. Sci. **9**, 377 (2025); doi:10.3390/jcs9070377.
32. А. В. Касаткин, Н. В. Зубкова, В. В. Гуржий, Р. Шкода, Ф. Нестола, А. А. Агаханов, Н. В. Чуканов, Д. И. Белаковский, Д. Вшиянски, Ледневит $Cu[PO_3(OH)]\cdot H_2O$ – новый минерал из Мурзинского золоторудного месторождения, Алтайский край, Записки Российского минералогического общества **CLIII**(2), 71 (2024) [A. V. Kasatkin, N. V. Zubkova,

V. V. Gurzhiy, R. Škoda, F. Nestola, A. A. Agakhanov, N. V. Chukanov, D. I. Belakovskiy, and D. Všianský, Lednevite, $Cu[PO_3(OH)] \cdot H_2O$, a New Mineral from Murzinskoe Au Deposit, Altai Krai, Zapiski of the Russian Mineralogical Society **CLIII**(2), 71 (2024)]; doi: 10.31857/S0869605524020049.

33. https://chem.ch.huji.ac.il/nmr/techniques/1d/row3/p.html#properties.
34. H. Choi, I. Vinograd, C. Chaffey, and N. J. urro, "Inverse Laplace Transformation Analysis of Stretched Exponential Relaxation", J. Magn. Reson. **331**, 107050 (2021); doi:10.1016/j.jmr.2021.107050.
35. D. C. Johnston, "Stretched Exponential Relaxation Arising from a Continuous Sum of Exponential Decays", Phys. Rev. B **74**, 184430 (2006); doi:10.1103/PhysRevB.74.184430.
36. O. V. Petrov and S. Stapf, "Parameterization of NMR Relaxation Curves in Terms of Logarithmic Moments of the Relaxation Time Distribution", J. Magn. Reson. **279**, 29 (2017); doi:10.1016/j.jmr.2017.04.009.
37. M. Dupont, S. Capponi, N. Laflorencie, and E. Orignac, "Dynamical Response and Dimensional Crossover for Spatially Anisotropic Antiferromagnets", Phys. Rev. B **98**, 094403, (2018); doi:10.1103/PhysRevB.98.094403.