

УДК 535.3
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 01.04.05

Название статьи

И. О. Фамилия Автора¹ 0000–0001–1111–1111 *

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Ульяновский государственный педагогический
университет имени И. Н. Ульянова»*

Джон К. Ной^{0000–0001–1111–111X†}

*Институт динамики жидкости Г. Милля, факультет нанонауки и
промышленной математики, Мадридский университет Карлоса III,
Испания*

Получено: 12 декабря 2021 г. / Исправлено: 13 февраля 2022 г. / Принято:
14 февраля 2022 г. / Опубликовано: 18 февраля 2022 г.

*Электронный адрес: yfarjoun@math.mit.edu; Автор для переписки. Тел.: (+111) 11 11 11.

†Электронный адрес: neu@math.berkeley.edu

Аннотация. Взаимодействие сильно резонансных взаимодействий позволяет значительно улучшить функциональность многих электромагнитных устройств. Однако резонансы могут быть ослаблены джоулевыми и радиационными потерями. Хотя во многих случаях Джоулевы потери могут быть сведены к минимуму благодаря выбору составляющих материалов, управление радиационными потерями часто является большой проблемой. Недавние решения включают использование связанных лучистых и сублучистых мод, дающих узкие асимметричные резонансы Фано в широком диапазоне систем: от дефектных состояний в фотонных кристаллах и оптических волноводах с мезоскопическими кольцевыми резонаторами до наноразмерных плазмонных и метамагнитных систем, проявляющих интерференционные эффекты, сходные с электромагнитным индуцированной прозрачностью. Здесь мы теоретически демонстрируем и экспериментально подтверждаем новый механизм резонансной электромагнитной прозрачности, который дает очень узкие изолированные симметричные линии Лоренца в тороидальных метаматериалах.

Abstract. The interaction of highly resonant interactions can significantly improve the functionality of many electromagnetic devices. However, resonances can be attenuated by Joule and radiation losses. Although in many cases Joule loss can be minimized through the choice of constituent materials, the management of radiation loss is often a big problem. Recent solutions include the use of coupled radiant and subradiant modes, producing narrow asymmetric Fano resonances in a wide range of systems, from defect states in photonic crystals and optical waveguides with mesoscopic ring resonators to nanoscale plasmonic and metamagnetic systems exhibiting interference effects similar to electromagnetic induced transparency. Here we theoretically demonstrate and experimentally confirm a new mechanism of resonant electromagnetic transparency, which gives very narrow isolated symmetric Lorentz lines in toroidal metamaterials.

Ключевые слова: оптика, оптический волновод, тороидальные метаматериалы

PACS: 003.007

Введение

Тороидальный диполь (и более высокие тороидальные мультиполи) не является частью стандартного мультипольного разложения, которое обычно представляется в виде суммы вкладов от двух семейств обычных источников элементарного излучения, а именно от магнитных и электрических динамических мультиполей. В сферической системе координат магнитные мультиполи

определяются поперечными компонентами плотности осциллирующего тока (например, течениями, протекающими на поверхности сферы), а электрические мультиполи относятся к колебательной плотности заряда.

В физике ядер статический тороидальный момент является устоявшимся понятием, также называемым анаполем. Он был рассчитан для ряда ядерных систем и детально исследован теоретически и экспериментально, в частности, за его роль в ядерном спин-зависимом нарушении атомной чётности. Тороидальный момент также был идентифицирован по первым принципиальным расчетам в макромолекулах углерода и сегнетоэлектрических наноструктурах.

Обзор

В статье [1] были рассмотрены проблемы без обрыва и маскировки, использующие принцип поверхностной эквивалентности, накладывая на любой произвольной границе контроль разрыва допуска между общим объектом (с плащом или без него) и фоном. После тщательной демонстрации мы применяем эту модель к необратимой проблеме, обращаясь к аналоговому режиму и метамолекулам, а также к проблеме маскировки, обращаясь к дизайну метафоры не-Фостера. Получено прямое аналитическое условие для управления рассеянием диэлектрического объекта по интересующей поверхности. Предыдущие квазистатические результаты подтверждены и представлено общее закрытое решение за пределами субволнового режима. Кроме того, эта формулировка может быть распространена на другие волновые явления, как только будет определена правильная функция допуска (тепловая, акустическая, эластомеханическая и т. д.).

В статье [2] были исследованы особенности рассеяния света от субволновых частиц, изготовленных из материалов с высоким показателем преломления, вызванных сосуществованием отдельных анапольных мод как электрического, так и магнитного характера. Сходства и различия таких анапольных мод подробно обсуждаются. Мы также показываем, что эти два типа анапольных мод могут поддерживаться одновременно субволновыми сферическими диэлектрическими частицами с высоким индексом.

Нерадикальные конфигурации заряда-тока с участием тороидальных ди-

полей привлекли внимание в широком спектре различных областей физики [3]. В таких конфигурациях режима электрические и тороидальные дипольные моды, так называемые анаполы, отменяют друг друга в дальнем поле [4–6] как следствие обеих дипольных мод, разделяющих одну и ту же диаграмму направленности. Такие анаполы были впервые экспериментально обнаружены в конфигурациях с участием нескольких частиц с магнитным дипольным моментом, таких как резонаторы с расщепленным кольцом [4]. Интересно, что недавно было предсказано, что эти моды могут существовать в гораздо более простом случае одиночной изолированной частицы с высоким индексом [5, 6]. Это предсказание экспериментально подтверждено на оптических частотах с использованием нанодисков кремния [5]. Возбуждение анапольных мод в малых частицах с высоким показателем преломления позволяет резко уменьшить их сечение рассеяния, которое может достигать значений, значительно меньших предела Рэлея для нерезонансного возбуждения одного электрического дипольного режима [2]. До сих пор анапольные моды обсуждались в контексте подавления электрического дипольного излучения, то есть как интерференционный эффект, обусловленный одновременным возбуждением электрического дипольного и электрического тороидальных дипольных моментов. Электрический диполь связан с колебательными зарядами, а тороидальный диполь связан с полоидальным током на поверхности тора. Однако можно представить себе и двойственную ситуацию, при которой намагничивающие токи, текущие на поверхности тора, генерируют магнитную тороидальную дипольную моду. При некоторых обстоятельствах этот магнитный тороидальный момент, который разделял бы характеристики излучения с обычным магнитным диполем, также мог бы привести к полному подавлению излучения из системы (так называемый магнитный анаполь).

В [6] изучая рассеяние нормально падающих плоских волн на одну нанопроволоку, была раскрыта незаменимая роль тороидального мультипольного возбуждения в мультипольных разложениях излучающих источников. Обнаружено, что для p -поляризованных и s -поляризованных падающих волн тороидальные диполи могут эффективно возбуждаться в однородных диэлектрических нанопроводах в режиме оптического спектра. Далее мы продемонстрируем, что нанопроволоки с плазмонной сердцевинной – оболочкой могут быть невидимы с помощью деструктивной интерференции электрических и

тороидальных диполей, что может вдохновлять многие исследования взаимодействия света на основе нанопроволоки и инкубировать биологические и медицинские приложения, которые требуют неинвазивных детектирования и измерений.

В [7] было обнаружено, что изотропная однородная субволновая частица с высоким показателем преломления может производить сверхмалое полное рассеяние. Этот эффект, который следует из торможения электрического дипольного излучения, может быть идентифицирован как резонанс Фано в эффективности рассеяния и связан с возбуждением анапольной моды в частице. Этот анапольный режим является нерадиационным и выходит из деструктивной интерференции электрических и тороидальных диполей. Эффект невидимости может быть полезен для разработки высокопрозрачных оптических материалов.

Теоретические методы и материалы

В предыдущих статьях Авторов было получено адекватное выражение для плотности темной материи:

$$B = \int_0^{\infty} \frac{\xi^2 d\xi}{\sqrt{\eta + \xi^2}} \frac{1 - e^{-\Phi(\eta, \xi)}}{e^{\sigma(\eta + \xi^2)^{1/2}} - 1}, \quad (1)$$

где σ – параметр темноты материи. Фазовая траектория Лагранжиана (1) на моментальной сфере Фридмана показана на рис. 1.

Таблица 1. Некоторые значения S .

σ	S	σ	S	σ	S	$\approx S$
1	1	3	3	5	6	5.9909
2	2	4	4	5	6	6.0010

Экспериментальные значения S , полученные на Главном Синхрофазотроне нашим коллегой из Долины Баобабов, приведены в Таблице 1. В дальнейшем, однако, мы будем рассматривать более сложную модель регенерации темной материи из межбранного зазора с учетом взаимодействия суперструн

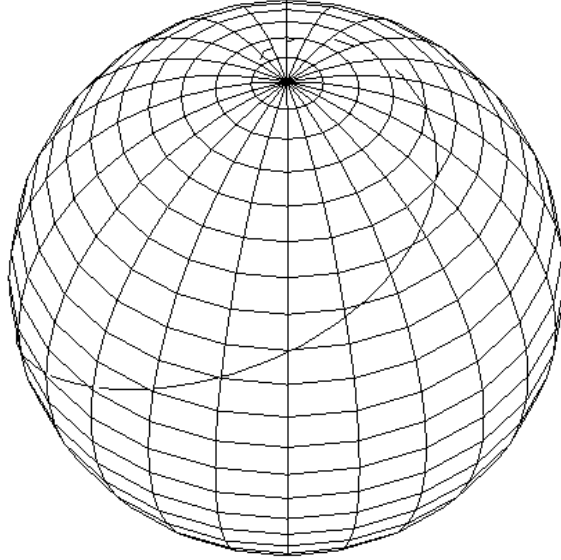


Рис. 1. Локсодрома на сфере.

с микрогеонами. В этом случае необходимо использовать более сложное выражение, нежели (1):

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \int_0^{\infty} \frac{\xi^2 d\xi}{\sqrt{\eta + \xi^2}} \times \left(\frac{1}{e^{\sigma\xi} - 1} - \frac{1}{e^{\sigma\sqrt{\eta + \xi^2}} - 1} \right) \equiv \\ &\equiv \int_0^{\infty} \frac{\xi^2 d\xi}{\sqrt{\eta + \xi^2}} \frac{1}{e^{\sigma\xi} - 1} - \int_0^{\infty} \frac{\xi^2 d\xi}{\sqrt{\eta + \xi^2}} \frac{1}{e^{\sigma\sqrt{\eta + \xi^2}} - 1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Формулу можно поместить внутри текста: $y = \sin x$ или сделать отдельным абзацем:

$$\int_a^b x^2 dx = \frac{x^3}{3} \Big|_a^b. \quad (3)$$

Заключение

Мы считаем, что наблюдаемое явление резонансной прозрачности является первым примером проявления нетривиального возбуждения неизлучающего заряда-тока, а тороидальные метамагнитные матрицы, работающие при резонансе прозрачности, могут служить источником некомпенсированного векторного потенциала \mathbf{A} , хотя в нашем случае деструктивная интерференция между электрическим и тороидальным дипольными моментами не приводит к полному сокращению их рассеяния, остаточное дипольное из-

лучение (которое сходится в направлении вперед и назад для бесконечного массива субволновой периодичности) подавляется более высокие мультиполи, тогда как калибровочно-инвариантный вектор-потенциал должен генерироваться взаимно компенсированными вкладами P и T . Здесь из-за двумерной периодичности массивов метаматериалов нетривиальная компонента поля векторного потенциала является. Предполагается локализовать в плоскости структуры метаматериала.

В заключение мы определили класс метаматериалов, поддерживающий новый механизм резонансной электромагнитной прозрачности, который отличается от помех Фано, обычно встречающихся в системах плазмоники и метаматериалов, имитирующих электромагнитно-индуцированную прозрачность. Он использует деструктивную интерференцию между пространственно и спектрально совмещенными и когерентно осциллирующими индуцированными электрическими и тороидальными диполями и создает очень узкие и характерно симметричные линии Лоренца прозрачности с Q факторами, превышающими 300. Такая мода резонансного возбуждения метаматериала соответствует долгожданной реализации нетривиальная неизлучающая конфигурация заряда-тока, которая может генерировать волны калибровочно-неприводимого векторного потенциала в отсутствие рассеянных (отражённых) электромагнитных полей.

Список использованных источников

1. Labate Giuseppe, Alù Andrea, Matekovits Ladislau. Surface-admittance equivalence principle for nonradiating and cloaking problems // Physical Review A. — 2017. — jun. — Vol. 95, no. 6. — Access mode: <https://doi.org/10.1103/physreva.95.063841>.
2. Suppression of scattering for small dielectric particles: anapole mode and invisibility / Boris Lukyanchuk, Ramón Paniagua-Domínguez, Arseniy I. Kuznetsov et al. // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 2017. — feb. — Vol. 375, no. 2090. — P. 20160069. — Access mode: <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0069>.
3. Electromagnetic toroidal excitations in matter and free space / N. Papasi-makis, V. A. Fedotov, V. Savinov et al. // Nature Materials. — 2016. — feb. — Vol. 15, no. 3. — P. 263–271. — Access mode: <https://doi.org/10.1038/nmat4563>.

4. Resonant Transparency and Non-Trivial Non-Radiating Excitations in Toroidal Metamaterials / V. A. Fedotov, A. V. Rogacheva, V. Savinov et al. // Scientific Reports. — 2013. — oct. — Vol. 3, no. 1. — Access mode: <https://doi.org/10.1038/srep02967>.
5. Nonradiating anapole modes in dielectric nanoparticles / Andrey E. Miroshnichenko, Andrey B. Evlyukhin, Ye Feng Yu et al. // Nature Communications. — 2015. — aug. — Vol. 6. — P. 8069. — Access mode: <https://doi.org/10.1038/ncomms9069>.
6. Invisible nanowires with interfering electric and toroidal dipoles / Wei Liu, Jianfa Zhang, Bing Lei et al. // Optics Letters. — 2015. — may. — Vol. 40, no. 10. — P. 2293. — Access mode: <https://doi.org/10.1364/ol.40.002293>.
7. Hybrid anapole modes of high-index dielectric nanoparticles / Boris Lukyanchuk, Ramón Paniagua-Domínguez, Arseniy I. Kuznetsov et al. // Physical Review A. — 2017. — jun. — Vol. 95, no. 6. — Access mode: <https://doi.org/10.1103/physreva.95.063820>.

Сведения об авторах:

Фамилия Имя Отчество, доктор физико-математических наук, профессор
кафедры такой-то такого-то вуза; индекс, город, улица, номер дома;

тел. (000)0000000;

e-mail: neu@math.berkeley.edu;

ORCID iD 0000-0001-1111-111X;

Web of Science ResearcherID LLL-0000-2021;

SCOPUS ID 1111111111

Title

Name of Author's name1⁰⁰⁰⁰⁻⁰⁰⁰¹⁻¹¹¹¹⁻¹¹¹¹ *

Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russia

John C. Neu^{0000-0001-1111-111X}†

*G. Millán Institute of Fluid Dynamics,
Nanoscience and Industrial Mathematics,
Universidad Carlos III de Madrid, Spain*

Received: December 12, 2021 / Revised: February 13, 2022 / Accepted: February 14, 2022 / Published: February 18, 2022

Abstract. The interaction of highly resonant interactions can significantly improve the functionality of many electromagnetic devices. However, resonances can be attenuated by Joule and radiation losses. Although in many cases Joule loss can be minimized through the choice of constituent materials, the management of radiation loss is often a big problem. Recent solutions include the use of coupled radiant and subradiant modes, producing narrow asymmetric Fano resonances in a wide range of systems, from defect states in photonic crystals and optical waveguides with mesoscopic ring resonators to nanoscale plasmonic and metamagnetic systems exhibiting interference effects similar to electromagnetic induced transparency. Here we theoretically demonstrate and experimentally confirm a new mechanism of resonant electromagnetic transparency, which gives very narrow isolated symmetric Lorentz lines in toroidal metamaterials.

Keywords: optics, optical waveguide, toroidal metamaterials

PACS: 003.007

*Electronic address: yfarjoun@math.mit.edu; Corresponding author. Tel.: (+111) 11 11 11.

†Electronic address: neu@math.berkeley.edu

References

1. Electromagnetic toroidal excitations in matter and free space / N. Papasimakis, V. A. Fedotov, V. Savinov et al. // *Nature Materials*. — 2016. — feb. — Vol. 15, no. 3. — P. 263–271. — Access mode: <https://doi.org/10.1038/nmat4563>.
2. Resonant Transparency and Non-Trivial Non-Radiating Excitations in Toroidal Metamaterials / V. A. Fedotov, A. V. Rogacheva, V. Savinov et al. // *Scientific Reports*. — 2013. — oct. — Vol. 3, no. 1. — Access mode: <https://doi.org/10.1038/srep02967>.
3. Nonradiating anapole modes in dielectric nanoparticles / Andrey E. Miroshnichenko, Andrey B. Evlyukhin, Ye Feng Yu et al. // *Nature Communications*. — 2015. — aug. — Vol. 6. — P. 8069. — Access mode: <https://doi.org/10.1038/ncomms9069>.
4. Invisible nanowires with interfering electric and toroidal dipoles / Wei Liu, Jianfa Zhang, Bing Lei et al. // *Optics Letters*. — 2015. — may. — Vol. 40, no. 10. — P. 2293. — Access mode: <https://doi.org/10.1364/ol.40.002293>.
5. Suppression of scattering for small dielectric particles: anapole mode and invisibility / Boris Lukyanchuk, Ramón Paniagua-Domínguez, Arseniy I. Kuznetsov et al. // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. — 2017. — feb. — Vol. 375, no. 2090. — P. 20160069. — Access mode: <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0069>.
6. Labate Giuseppe, Alù Andrea, Matekovits Ladislau. Surface-admittance equivalence principle for nonradiating and cloaking problems // *Physical Review A*. — 2017. — jun. — Vol. 95, no. 6. — Access mode: <https://doi.org/10.1103/physreva.95.063841>.
7. Hybrid anapole modes of high-index dielectric nanoparticles / Boris Lukyanchuk, Ramón Paniagua-Domínguez, Arseniy I. Kuznetsov et al. // *Physical Review A*. — 2017. — jun. — Vol. 95, no. 6. — Access mode: <https://doi.org/10.1103/physreva.95.063820>.
8. Lewis Robert R. Anapole moments of atoms // *Physical Review A*. — 1993. — dec. — Vol. 48, no. 6. — P. 4107–4112. — Access mode: <https://doi.org/10.1103/physreva.48.4107>.

Information about authors:

Surname First name Patronymic, Doctor of Physical and Mathematical Sci-

ences, professor of the department of such and such a university; zip code, city,
street, house number;

tel. (000)0000000;

e-mail: neu@math.berkeley.edu;

ORCID iD 0000-0001-1111-111X;

Web of Science ResearcherID LLL-0000-2021;

SCOPUS ID 1111111111