

Киральные свойства молекулы ДНК и поляризационная селективность её электромагнитного излучения

И. В. СЕМЧЕНКО, А. П. БАЛМАКОВ

Изучение киральных (зеркально-асимметричных) сред уже много лет вызывает оживленный интерес во всем мире. Это направление физического знания в настоящее время динамично развивается, имея для этого неплохие перспективы, связанные, в первую очередь, с потенциальной возможностью применения этих знаний в самых разных областях науки и техники.

Ранее изучение оптической активности киральных сред проводилось на примерах природных кристаллов и искусственных композитных материалов [1 – 4]. В данной статье приводятся результаты работы авторов над проблемой излучения электромагнитного поля биологическими спиральными структурами, главным образом – молекулами дезоксирибонуклеиновых кислот (ДНК). Таким образом, вектор исследований сместился в пограничную с молекулярной биологией область физики, и здесь на первый план вышла молекула ДНК, как один из самых ярких примеров киральных объектов живой природы.

Исследование физических процессов в биологических молекулах – непростая задача. Это обусловлено чрезвычайной сложностью процессов, протекающих в живых организмах. Однако познание законов взаимодействия физических полей с объектами молекулярной биологии открывает перед наукой новые перспективы развития, создает возможности более близкого понимания живой природы в целом.

Как известно, спиралевидные молекулы, входящие в структуру вещества, обладают способностью поворачивать плоскость поляризации электромагнитных волн. Нами ставилась задача проанализировать механизм образования электромагнитных волн молекулой ДНК, проследить характер поляризации этих волн в зависимости от различных параметров спиральной молекулы.

Поставленная задача решалась в рамках теории дипольного излучения электромагнитных волн. Электрический ток в ДНК, как макроскопической периодической структуре, представлен движущимися вдоль спиралевидной траектории электронами. Граничным условием для тока является его обращение в нуль на концах активированного участка спирали.

Сила электрического тока может быть представлена в виде ряда Фурье

$$I(l) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(n \frac{2\pi}{P} l\right), \quad (1)$$

где P – длина одного целого витка ДНК, n – целое число, l – координата, отсчитываемая вдоль спирали.

Смещение электронов вдоль спирали, а, следовательно, и образование микротоков (1) может происходить вследствие влияния на ДНК внешней падающей электромагнитной волны. При этом в молекуле одновременно возникают электрический дипольный \vec{p} и магнитный \vec{m} моменты, связанные между собой. Первый характеризует смещение электронов на исследуемом участке молекулы и пропорционален напряженности электрического поля и скорости изменения напряженности магнитного поля. Второй определяется характером микротоков и пропорционален напряженности магнитного поля и скорости изменения напряженности электрического поля.

Взаимодействие ДНК с электромагнитным полем происходит наиболее конструктивно при условии главного резонанса. Главный резонанс имеет место при $n=1$, если длина волны электромагнитного излучения приблизительно равна длине витка P спирали ДНК:

$$\lambda_{рез} = P. \quad (2)$$

Мы показали, что в молекуле ДНК при выполнении условия главного резонанса (2) одновременно индуцируется электрический дипольный момент и не менее значимый магнитный момент. Эти моменты дают равные по абсолютной величине вклады в электромагнитное поле, излучаемое молекулой. Указанное обстоятельство приводит к поляризационной селективности взаимодействия молекулы ДНК с электромагнитным излучением.

Экспериментальные данные свидетельствуют [5], что молекула ДНК является двойной правой спиралью с радиусом $r = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ и шагом $h = 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ (по другим данным [7]: $r = 1,19 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ и $h = 3,32 \cdot 10^{-9} \text{ м}$).

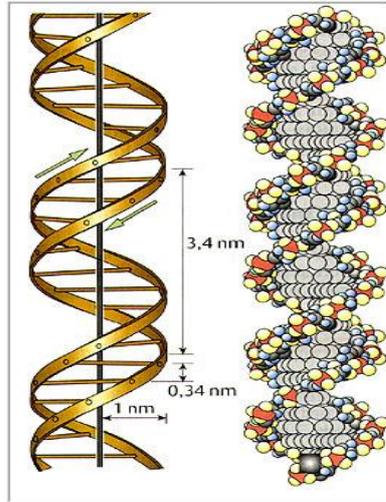


Рисунок 1 – Фрагмент молекулы ДНК

По этим данным нетрудно посчитать длину одного целого витка спирали:

$$P = \sqrt{(2\pi r)^2 + h^2}. \quad (3)$$

Исходя из этого, P принадлежит интервалу 7,14 – 8,17 нм, а значит $\lambda_{\text{рез}}$ соответствует рентгеновскому диапазону электромагнитных волн.

По известному шагу и радиусу спирали, исходя из геометрических соображений, мы можем вычислить угол подъема спирали (угол между касательной к спирали и плоскостью, перпендикулярной оси спирали):

$$\alpha_{\text{эксн}} = \text{arcctg}(qr), \quad (4)$$

для ДНК экспериментальный угол подъема $\alpha_{\text{эксн}}$ лежит в интервале $24^\circ - 28,43^\circ$, где $|q| = 2\pi/h$ – удельное кручение спирали; $q > 0$ для правой спирали и $q < 0$ для левой спирали.

Нами вычислены электрический дипольный момент и магнитный момент для половины каждого витка спирали. Проекции этих моментов на ось спирали играют главную роль при излучении электромагнитного поля в направлении, ортогональном оси спирали. Показано, что проекции моментов на ось спирали связаны между собой универсальным соотношением, которое выполняется при произвольном электрическом токе в спирали ДНК:

$$p_x = \frac{2i}{\omega r^2 q} m_x. \quad (5)$$

Здесь ω – циклическая частота тока, i – мнимая единица, а ось x направлена вдоль оси спирали ДНК. Следовательно, полученное универсальное соотношение остается справедливым при любой последовательности азотистых оснований в ДНК.

Рассмотрен некоторый спиральный осциллятор с произвольным распределением электрического тока и получено условие, при котором спираль излучает циркулярно-поляризованную электромагнитную волну в направлении, ортогональном оси спирали:

$$|p_x| = \frac{1}{c} |m_x|, \quad (6)$$

где c – скорость света в вакууме.

При этом вектор излучаемого поля имеет противоположное направление вращения в пространстве относительно излучающей спирали. Излучение циркулярной волны с другим знаком поляризации не происходит ни при какой поляризации падающей волны, возбуждающей ток в спирали.

Показано, что такой эффект поляризационной селективности может иметь место только при строго определенном угле подъема спирали. Получено тригонометрическое уравнение для определения оптимального угла подъема спирали

$$\sin^2 \alpha_{\text{теор}} + 2 \sin \alpha_{\text{теор}} - 1 = 0 \quad (7)$$

и найдено его решение $\alpha_{\text{теор}} = 24,5^\circ$.

При полученном угле подъема спирали $\alpha_{\text{теор}}$ имеет место одновременное выполнение условий (2) и (6). В то же время соотношение (5) является универсальным и справедливо для спирали с произвольным углом подъема.

Мы сравнили теоретически рассчитанный оптимальный угол подъема спирали с углом подъема двойной спирали ДНК, известным из экспериментальных данных (4). Относительное отклонение теоретически рассчитанного угла подъема от угла, наблюдаемого в экспериментах, составляет 2,1% – 13,9%.

В дипольном приближении напряженность электрического поля излучаемой волны имеет вид:

$$\vec{E}(\vec{R}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi R} \left(\left[\ddot{\vec{p}} \vec{n} \right] + \frac{1}{c} \left[\vec{n} \ddot{\vec{m}} \right] \right), \quad (8)$$

где \vec{R} – радиус-вектор, проведенный от спирали в точку наблюдения, \vec{n} – единичный вектор волновой нормали, μ_0 – магнитная постоянная, точки над векторами означают дифференцирование по времени.

Выберем вектор \vec{n} вдоль оси Oy (перпендикулярно оси спирали Ox), тогда из (8) получаем

$$\vec{E}(\vec{R}, t) = \frac{\mu_0 \omega^2}{4\pi R} \left(p_x \vec{x}_0 + \frac{1}{c} m_x \vec{z}_0 \right), \quad (9)$$

где \vec{x}_0 и \vec{z}_0 – единичные векторы, направленные вдоль осей Ox и Oz и учтено, что $\ddot{p}_x = -\omega^2 p_x$. Основную роль играют компоненты моментов вдоль оси спирали ДНК: $|p_z| \ll |p_x|$, $|m_z| \ll |m_x|$. Выполнение данных неравенств обеспечивается тем, что молекула ДНК является двойной спиралью и обладает симметрией относительно поворота на 180° вокруг оси спирали. Учитывая (5) и (6), для $q > 0$ находим, что

$$E_x = iE_z. \quad (10)$$

Следовательно, можно сделать вывод, что в условиях резонанса ДНК излучает преимущественно левополяризованную циркулярную электромагнитную волну. Знак поляризации излучаемой волны остается неизменным при произвольном распределении электрического тока в ДНК, то есть при любой последовательности азотистых оснований в ДНК.

Этот эффект поляризационной селективности, по-видимому, играет важную роль при генетическом сохранении различий между правовинтовыми и левовинтовыми формами объектов живой природы.

Abstract.

Литература

1. Бокуть Б.В., Сердюков А.Н. К феноменологической теории естественной оптической активности. // ЖЭТФ. – 1971. – Т. 61, № 5. – С.1808 – 1813.
2. Федоров Ф.И. Теория гиротропии. – Минск: Наука и техника, 1976. – 452 с.

3. Serdyukov A.N., Semchenko I.V., Tretyakov S.A., and Sihvola A.H. Electromagnetics of bi-anisotropic materials, Gordon and Breach Science Publishers, 2001.
4. Semchenko I.V., Khakhomov S.A., Samofalov A.L. Polarization Plane Rotation of Electromagnetic Waves by the Artificial Periodic Structure with One-Turn Helical Elements, Electromagnetics, vol. 26, no. 3-4, p. 219-233, 2006.
5. Taylor D. J., Green N. P. O., Stout G. W., Soper R. (ed.), Biological Science 1 and 2, Cambridge University Press, 1997.
6. Watson J. D. and Crick F. H. C., A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid, 1953, Nature, vol.171, pp. 737-738.
7. DNA. (2006, June 1). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 12:47, June 1, 2006, from <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=DNA&oldid=56282939>.

Гомельский государственный
университет имени Ф. Скорины

Поступило 11.09.06

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ