

УДК 372.853  
ББК 74.262.23

DOI: 10.31862/1819-463X-2023-4-192-204

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ШКОЛЬНИКОВ

Е. А. Михайлов, М. В. Пашенцева

**Аннотация.** *Описывается опыт организации исследовательской деятельности школьников в области физики, связанный с моделированием космических магнитных полей. С этой целью школьникам читался специализированный курс, содержащий необходимые сведения из физики, астрономии и математики. Кроме того, проводилось обучение старшеклассников основам программирования на одном из распространенных алгоритмических языков. На основе полученных знаний и навыков формулировалась задача, представляющая собой адаптированный вариант актуальных проблем космического магнетизма. В одном из случаев рассматривались магнитные поля аккреционных дисков, в другом – магнитные поля галактик. Их эволюция описывается при помощи механизма динамо, основанного на особенностях вращения космических объектов и свойств турбулентности. Школьникам предлагался упрощенный вариант задачи, позволяющий описать его с использованием ряда приближений и избежать деталей, являющихся излишне сложными для понимания. Тем не менее возникающие уравнения не допускают решения с помощью методов школьной математики. Для нахождения магнитных полей учащимся было необходимо составить собственную компьютерную программу, которая позволяет смоделировать процессы, происходящие в аккреционных дисках и спиральных галактиках. Она реализует простейшие численные методы – такие, как схему Эйлера, – дающие возможность вычислить зависимость магнитного поля от расстояния. В настоящей работе представлены уравнения и детально описаны методы их решения, которые оказались доступны для учащихся старших классов. Продемонстрированы результаты, полученные с помощью программ, написанных нашими учениками из различных школ. Важно, что, несмотря на явную простоту постановки задачи, они качественно воспроизводят данные, которые представлены в современных научных исследованиях по астрофизике. Данные работы получили высокую оценку на различных конференциях и конкурсах как в России, так и в других странах, освещались в СМИ.*

© Михайлов Е. А., Пашенцева М. В., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License  
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

**Ключевые слова:** космический магнетизм, математическое моделирование, галактики, аккреционные диски.

**Для цитирования:** Михайлов Е. А., Пашенцева М. В. Компьютерное моделирование космических магнитных полей в исследовательской деятельности школьников // Наука и школа. 2023. № 4. С. 192–204. DOI: 10.31862/1819-463X-2023-4-192-204.

## COMPUTER MODELING OF SPACE MAGNETIC FIELDS IN RESEARCH WORK OF SCHOOL PUPILS

E. A. Mikhailov, M. V. Pashentseva

**Abstract.** *The experience of organizing research work in physics of school pupils associated with modeling space magnetic fields is described. For this purpose, a special course which contains all necessary information from physics, astronomy and mathematics was developed for school pupils. In addition, they were taught the basics of programming in one of the most common algorithmic languages. Based on this material, a task which is an adapted version of the existing problems of space magnetism was formulated. In one of the cases, the magnetic fields of accretion disks were considered, in the other, the magnetic fields of galactic objects. Their generation is connected with the dynamo based on the features of the rotation of space objects and the properties of turbulence. Pupils were offered a simplified version of the problem, which allows them to describe it using a number of approximations and omitting details that are too difficult to understand. However, the resulting equations cannot be solved using the methods of school mathematics. To find the magnetic fields, the students had to create their own computer program that allowed them to simulate the processes occurring in accretion disks and spiral galaxies. It implements the simplest numerical methods, such as the Euler scheme, that make it possible to calculate the dependence of the magnetic field on distance. This paper presents equations and describes in detail the methods for solving them, which can be used by school pupils. The results obtained with the help of programs written by our pupils from different schools are shown. It is important that despite the obvious simplicity of the problem statement, they qualitatively reproduce the data that are presented in modern scientific research in astrophysics. These works were highly appreciated at various conferences and competitions both in Russia and abroad, presented in mass media.*

**Keywords:** *space magnetism, mathematical modeling, galaxies, accretion disks.*

**Cite as:** Mikhailov E. A., Pashentseva M. V. Computer modeling of space magnetic fields in research work of school pupils. *Nauka i shkola*. 2023, No. 4, pp. 192–204. DOI: 10.31862/1819-463X-2023-4-192-204.

### 1. Введение

В настоящее время, согласно Федеральному государственному образовательному стандарту среднего общего образования, каждый учащийся 10–11-х классов должен выполнить за время обучения индивидуальный

проект [1]. Он представляет собой особую форму организации учебной деятельности в старшей школе и призван решению сразу нескольких задач. В первую очередь он служит формированию у учащихся первоначальных навыков исследовательской деятельности, призван развивать у них

критическое мышление. В результате выполнения индивидуального проекта ученик должен научиться не только воспроизводить имеющиеся знания, но и применять их при решении различных актуальных задач. Особо в Федеральном государственном образовательном стандарте отмечается возможность использования знаний из различных предметных областей [1].

Правильный выбор темы исследовательского проекта нередко представляет собой не самую простую задачу как для учащегося, так и для учителя. Так, наиболее предпочтительными представляются задачи, которые связаны с актуальными проблемами науки и техники [2]. Подобные проекты позволяют школьнику по-настоящему понять, что такое научная работа, сформировать навыки инновационной деятельности, которые крайне необходимы в наше время [3]. Между тем постановка подобных задач представляет определенную сложность. Большинство современных научных исследований в области естественных и математических наук либо требуют дорогостоящего экспериментального оборудования, либо подразумевают использование уравнений, которые не могут быть решены без использования методов высшей математики. Естественно, в такой ситуации сложно говорить о возможности привлечения к подобной работе школьников напрямую.

В то же время большое количество задач допускают формулировку, адаптированную для школьников. Так, дифференциальные уравнения можно заметно упростить или вообще свести к алгебраическим. Большое количество сложных математических обоснований могут быть качественно описаны с помощью физических аналогий, а подчас и вовсе с использованием «житейской логики». Так, например, сила сопротивления воздуха при больших скоростях может быть выведена, опираясь на метод анализа размерностей [4], а скорость остывания

тела – вычислена исходя из логически понятного соображения о том, что чем больше перепад температур, тем быстрее происходит охлаждение [5]. Тем не менее даже в таких случаях возникают уравнения, которые оказываются сложными или вовсе невозможными для решения в средней школе.

Одним из возможных способов решения указанной проблемы является использование компьютерных методов. Даже для довольно сложных задач приближенное решение может быть получено с применением различных численных схем [6]. Конечно, в настоящий момент существует большое количество стандартных пакетов, позволяющих решать различные уравнения математики и физики [7]. Вместе с тем с педагогической точки зрения гораздо более эффективно самостоятельное написание программ, которые реализуют соответствующие численные методы. Кроме того, опыт научной работы показывает, что в большом количестве случаев стандартные коды справляются с поставленными задачами гораздо менее эффективно, чем написанные самостоятельно с учетом всех особенностей задачи.

В настоящий момент существует ряд работ как учебного, так и методического характера, посвященных обучению школьников методам компьютерного моделирования [8–10]. Они обобщают многолетний опыт, связанный с проведением исследовательских работ, связанных с решением задач по физике при помощи компьютера. Нам представляется наиболее логичной схема, которая была реализована как на факультативных занятиях на базе физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова, так и в различных школах [11; 12]. В течение определенного периода школьникам читается специализированный курс, который включает в себя введение в методы компьютерного моделирования, и в соответствующую предметную область. Это предусматривает как по-

вторение разделов, входящих в школьную программу по математике, физике и ИКТ, так и изучение вопросов, ранее неизвестных школьнику. По мере освоения соответствующего материала учащиеся выполняют свое собственное исследование.

Одним из наиболее интересных направлений современной науки, которое может помочь в выборе действительно актуальной и интересной темы для школьного исследования, является космический магнетизм [13]. Он сочетает в себе как научную глубину, так и большое количество захватывающих фактов, способных увлечь ученика. Так, первые данные о космических магнитных полях связаны с солнечными пятнами, открытыми Галилео Галилеем с помощью первого телескопа еще четыре столетия назад. В результате дальнейших исследований стало понятно, что они являются проявлением солнечных магнитных полей. Генерация данных полей связана с так называемым механизмом динамо, который стал понятен научному сообществу лишь в XX в. [14]. Дело в том, что разные части Солнца вращаются с существенно отличающимися угловыми скоростями (приэкваториальные области вращаются быстрее приполярных). Кроме того, на Солнце присутствует турбулентность, обладающая достаточно интересными свойствами: в северном полушарии вихри закручены преимущественно в одном направлении, а в южном – в другом. За счет этого магнитное поле на Солнце усиливается и растет по закону, близкому к геометрической прогрессии (экспоненциальный рост). Дальнейшие исследования показали, что очень похожие процессы свойственны не только Солнцу, но и другим астрофизическим объектам, хотя они и очень значительно от него отличаются.

Так, в середине XX в. появились неопровержимые доказательства того, что наша Галактика – Млечный Путь – обладает структурами магнитного поля.

Это обнаружилось при изучении характеристик космических лучей, которые «ловят» с помощью различных детекторов. Если бы магнитного поля не было, то заряженные частицы космических лучей распространялись бы принципиально иначе [15]. В настоящий момент галактические магнитные поля являются предметом изучения как астрономов-наблюдателей (для этого создаются сложные радиотелескопы), так и теоретиков. Начиная с 1970-х гг. активно ведется изучение галактического динамо, которое принципиально схоже с солнечным, описанным выше (хотя и имеет большое количество особенностей) [15].

Большой интерес с точки зрения астрофизики представляют так называемые аккреционные диски. Они образуются вокруг массивных астрономических объектов: таких как черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды. Подобные объекты также могут обладать своими собственными магнитными полями, и логично предположить, что они связаны с действием аналогичных механизмов [16]. Совсем недавно в ходе изучения окрестностей сверхмассивной черной дыры в центре галактики M87 появились неопровержимые подтверждения данного факта [17].

Нам представляется крайне важным и интересным привлечение школьников старших классов к данной тематике в ходе выполнения ими исследовательских проектов. Естественно, это требует первоначальной адаптации соответствующих задач: само собой, что нельзя обсуждать с учениками решение дифференциальных уравнений математической физики в частных производных.

В основном работа велась в средних учебных заведениях, с которыми физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова имеет договора о сотрудничестве. Так, в Романовской школе выполнялись исследовательские работы, посвященные генерации магнитных полей галактик. Решались уравнения динамо, а также

исследовалась возможность движения частиц по траекториям, ассоциированным с линиями магнитного поля.

Между тем особо хотелось бы отметить нашу работу на базе Университетской гимназии МГУ имени М. В. Ломоносова. Здесь была организована группа учащихся, которые заинтересованы в выполнении исследовательского проекта, связанного с космическим магнетизмом. В рамках систематических (3 часа еженедельно) занятий было организовано изучение необходимых разделов физики, математики и астрономии, а также практические занятия по программированию. Школьники по мере развития уровня их подготовки приступали к выполнению проектных работ. Они занимались изучением магнитных полей аккреционных дисков с позиций теории динамо. Для этого они писали свои собственные компьютерные программы на языке С#, который является одним из наиболее популярных алгоритмических языков, используемых в настоящее время.

В настоящей работе мы обсуждаем как излагаемый учащимся материал, так и базовые особенности выполнявшихся проектов. Отметим, что их выполнение не требует какого-то запредельного уровня квалификации со стороны учащихся, и самым важным ключом к успеху является заинтересованность учащегося в работе по данному направлению.

## **2. Исследование генерации магнитных полей в аккреционных дисках**

Как мы отметили выше, вопрос о структуре и эволюции магнитного поля космических объектов является достаточно актуальным с точки зрения астрономии и магнитной газодинамики. Опишем наш опыт обучения школьников исследовательской деятельности на примере изучения эволюции магнитного поля в галактиках и аккреционных дисках.

Перед учащимися были поставлены такие задачи: изучить эффект динамо и параметры, которые влияют на эволюцию магнитного поля в различных объектах, а также решить данную задачу численно с помощью приложения на С#. Сначала мы обучили ребят основам программирования на данном языке. Его выбор был обусловлен тем, что это объектно-ориентированный язык, кроме того, на нем достаточно просто написать оконное приложение. Оконное приложение нам необходимо было создать для того, чтобы выводить полученные графики на экран компьютера.

В ходе занятий по программированию ребята изучили базовые типы данных, операторы языка С#. В каждом языке типы данных определяются по-своему, различным способом происходит перевод из одного типа данных в другой, поэтому было очень важным обратить на это внимание, чтобы в дальнейшем не было ошибок при численных расчетах. Кроме того, ребята изучили базовые алгоритмы (поиск минимума, максимума, нахождение делителей числа и т. п.). Такие базовые алгоритмы могут пригодиться во многих классах задач, несмотря на их простоту. Ребята научились писать функции в программе. Это помогает структурировать код, вывести повторяющиеся части кода в отдельное место. Далее мы рассказали про рекурсию, обработку строк в С#, одномерные и многомерные массивы [18]. Для лучшего закрепления материала к каждому занятию были подобраны задания, которые соответствовали уровню знаний школьников.

Наконец, ребята научились создавать оконные приложения с визуализацией на экране. Школьники создавали форму, на нее перетаскивали нужные им элементы управления. В созданных ими программах возможно организовать ввод и редактирование текста, устанавливать переключатели и флажки, включая и выключая те или иные режимы работы приложения [18].

Затем мы перешли к рассмотрению таких физических процессов, как падение тела под углом к горизонту без сопротивления воздуха и с ним, задачу обращения планет вокруг Солнца, задачу плавления тел [19]. Так как школьникам 10–11-го класса было бы сложно решить такие задачи аналитически, мы воспользовались методами численного моделирования. Одной из самых простых схем численного моделирования является явная схема Эйлера. Обычно такие схемы изучаются в университете, из-за этого школьнику может быть непонятна вся терминология. Поэтому для гимназистов мы объясняли схему Эйлера на основе физических аналогий [11]. Рассмотрим задачу движения тела вдоль прямой, когда скорость зависит от времени  $v = v(t)$ . Возьмем маленький промежуток времени  $\Delta t$ . В течение этого промежутка по времени будем считать, что величину, в данном случае скорость, можно считать постоянной, то есть движение будет равномерным. Тогда изменение координаты можно приближенно записать так:

$$\Delta x = v\Delta t.$$

Теперь, чтобы рассчитать движение тела на большом промежутке времени  $T$ , необходимо разделить его на маленькие отрезки  $\Delta t$ , на каждом из которых движение можно приближенно считать равномерным:

$$\Delta x_1 = v_0\Delta t, \quad \Delta x_2 = v_1\Delta t, \quad \dots, \quad \Delta x_N = v_{N-1}\Delta t;$$

$$x_1 = x_0 + \Delta x_1, \quad x_2 = x_1 + \Delta x_2, \quad \dots, \quad x_N = x_{N-1} + \Delta x_N.$$

Так мы получаем значение координаты в каждый момент времени:

$$x(t_1) \approx x_1, \quad x(t_2) \approx x_2, \quad \dots, \quad x(t_N) \approx x_N.$$

Это и будет нашим приближенным результатом, полученным с помощью схемы Эйлера.

Чтобы ребята лучше поняли значение этой схемы, можно показать, что, вычисляя изменение координаты по схеме Эйлера, мы ищем площадь под графиком скорости, высчитывая сумму площадей прямоугольников (рис. 1).

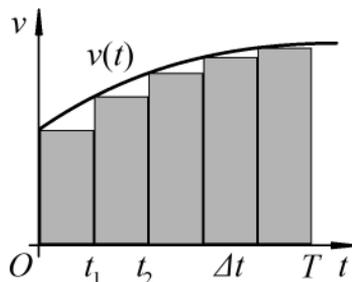


Рис. 1. Схема Эйлера

Такую схему можно применять для решения и других задач, которые сложно решить аналитически. Подробнее подобные подходы в изложении для школьников представлены в книге [19].

Следующим этапом было введение в космический магнетизм [20]. Гимназистам был прочитан ряд лекций по астрономии, астрофизике и, наконец, теории динамо. На лекциях были рассмотрены объекты, в которых могут образовываться магнитные поля. Прежде всего это галактики, Солнце, аккреционные диски вокруг белых карликов, нейтронных звезд и черных дыр. Мы рассказали про эволюцию звезд, чтобы было понятно, откуда появляются белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. Затем была прочитана лекция про Солнце. Как известно, магнитное поле впервые обнаружено именно на ближайшей к нам звезде – Солнце. Мы рассказали ребятам о том, откуда появляются пятна на Солнце, что такое протуберанец, как можно наблюдать за ближайшей к нам звездой, в чем проявляется активность на Солнце, и как оно может повредить нам. После этого было рассказано про аккреционные диски: что это такое и вокруг каких объектов они образуются. В них также присутствуют магнитные поля. Это было обнаружено совсем недавно в ходе изучения окрестностей сверхмассивной черной дыры в центре галактики M87 [17]. Для лучшего понимания объектов изучения учащимся

были показаны модели и иллюстрации космических тел.

После изучения объектов мы стали рассказывать ребятам про теорию динамо [13]. Механизм динамо используется для описания магнитных полей большого количества астрофизических объектов, таких как Солнце, другие звезды, галактики и т. д. Он характеризует рост магнитного поля за счет энергии турбулентных течений в космической среде. Работа динамо связана с одновременным действием двух механизмов: альфа-эффекта и дифференциального вращения. Дифференциальное вращение связано с тем, что космические объекты вращаются с меняющимися по мере удаления от оси угловыми скоростями. Закрученность турбулентных движений описывается при помощи альфа-эффекта. Этому противодействует турбулентная диффузия, стремящаяся разрушить крупномасштабные структуры.

Уравнения, описывающие эволюцию магнитного поля [21], достаточно сложны для учащихся 10–11-х классов, поэтому нами была предложена намного более простая модель генерации. Поле будет расти, если альфа-эффект и дифференциальное вращение преобладают над диффузией. Соответственно, можно взять такое уравнение в качестве простейшей модели генерации поля. В таком случае поле будет расти экспоненциально:

$$\frac{dB}{dt} = \gamma B,$$

где  $\gamma$  – скорость роста магнитного поля. Это уравнение является дифференциальным, которое ученики 10–11-го класса решать еще не могут. Удобно рассматривать это уравнение, пользуясь безразмерными величинами. Единицей

времени будет  $T = \frac{3h^2}{lu}$ , где  $h$  – полутолщина диска,  $l$  – масштаб турбулентности,  $u$  – скорость турбулентных движений [22]. Если  $h = 10^4$  км,  $l = 10^3$  км,

$u = 10$  км/с, то единица времени соответствует  $T = 3 \cdot 10^4$  с, или нескольким часам. Также можно измерять поле в типичных единицах, характерных для аккреционного диска, например  $10^{-6}$  Э [16].

Данная задача решается с помощью методов высшей математики. Однако в школьном случае можно использовать численные методы для решения этой задачи. Есть взять достаточно маленький промежуток времени  $\Delta t$ , то можно считать, что в течение него производная почти не меняется. Путем замены исходной зависимости кусочно-равномерной, мы можем вычислять приблизительно  $B(t + \Delta t)$  способом, похожим на тот, что был описан выше для задач механики:

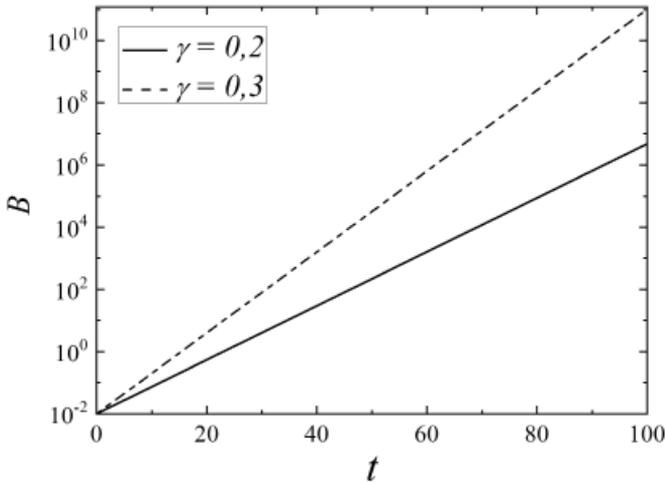
$$B(t + \Delta t) = B(t) + \gamma B(t) \cdot \Delta t.$$

Запрограммировав данную схему, ребята получили программу, которая вывела в файл значения магнитного поля в различные моменты времени. Поле растет достаточно быстро, поэтому удобно представлять зависимость в логарифмическом масштабе (рис. 2).

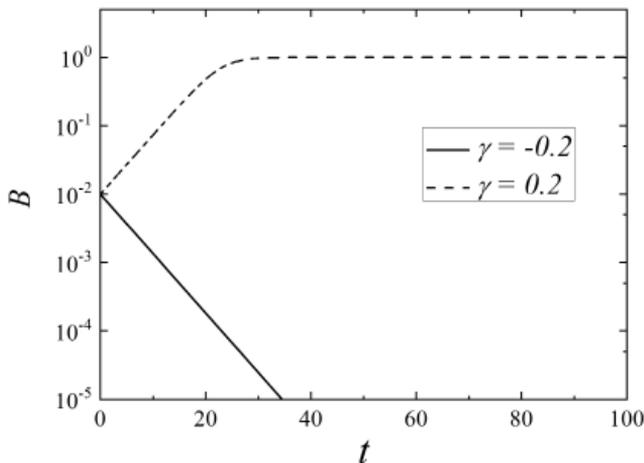
Школьники изменяли значение  $\gamma$  и получали разные результаты, соответствующие как растущему, так и затухающему полю. Из полученных результатов они поняли, что при  $\gamma > 0$  поле растет, в противном случае – затухает. В этом заключается пороговый характер механизма динамо. Кроме того, учащиеся поняли, что поле может расти бесконечно, что вряд ли возможно с физической точки зрения.

Вместо этой модели была предложена следующая. Чем ближе мы подходим к максимальному значению  $B_{\max}$  (так называемый уровень равномерного распределения [23]), тем медленнее должно расти поле. Данное обстоятельство можно учесть с помощью следующего уравнения:

$$\frac{dB}{dt} = \gamma B \left( 1 - \frac{B^2}{B_{\max}^2} \right).$$



**Рис. 2.** Рост поля при различных значениях  $\gamma$ . Сплошная линия показывает случай  $\gamma = 0,2$ , пунктирная –  $\gamma = 0,3$



**Рис. 3.** Нелинейная модель при  $B_{\max} = 1$ . Сплошная линия показывает случай  $\gamma = -0,2$ , пунктирная –  $\gamma = 0,2$

Построив такую модель по схеме Эйлера, мы получим уже более близкие к реальности результаты (рис. 3).

Школьники показали, что теперь поле не растёт до бесконечно больших масштабов. Его рост останавливается, а величина выходит на постоянное значение (уровень равномерного распределения).

Затем ребятам была представлена более сложная модель. Она связана с тем, что магнитное поле имеет

две составляющие: радиальную  $B_r$  и азимутальную  $B_\phi$  (рис. 4). Общее магнитное поле может быть получено как результат их суперпозиции. Как уже говорилось, альфа-эффект превращает азимутальное магнитное поле в радиальное, а дифференциальное вращение – радиальное в азимутальное. В тех же безразмерных переменных, которые описаны выше, данный процесс описывается с помощью двух коэффициентов:

$R_\alpha$ , который отвечает за закрученность турбулентных течений (альфа-эффект), и  $R_\omega$ , характеризующий дифференциальное вращение. В случае аккреционных дисков уравнения будут записываться так [23]:

$$\frac{dB_r}{dt} = -R_\alpha \left( 1 - \frac{B^2}{B_{\max}^2} \right) B_\varphi - \frac{\pi^2}{4} B_r;$$

$$\frac{dB_\varphi}{dt} = -\frac{3R_\omega}{2r^{1.5}} B_r - \frac{\pi^2}{4} B_\varphi;$$

где  $B = \sqrt{B_r^2 + B_\varphi^2}$  – полная величина магнитного поля, определяемая по теореме Пифагора. Управляющие параметры определяются из характеристик аккреционных дисков, известных в астрономии; показано, что для типичных объектов допустимо считать  $R_\alpha = 1$ ,  $R_\omega = 15$ , либо брать близкие к ним значения.

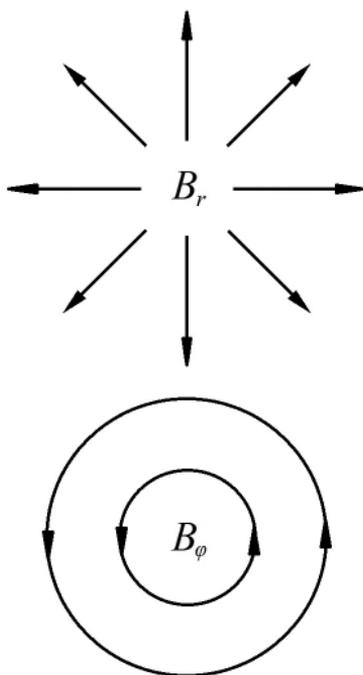


Рис. 4. Радиальное ( $B_r$ ) и азимутальное ( $B_\varphi$ ) поле

Далее уже для этой системы уравнений ученики построили схему Эйлера. Затем они создали новую программу с улучшенным функционалом, интерфейс которой представлен на рис. 5. Она позволяет выбирать параметры центрального объекта в аккреционном диске, его размеры и другие величины. После этого программа строит графики магнитного поля в зависимости от времени и от расстояния до центра диска.

Был проделан ряд численных экспериментов. Так, показано, что возможность роста магнитного поля определяется произведением  $D = R_\alpha R_\omega$ , которое также называется динамо-числом [23]. Если оно больше определенного критического значения  $D_{cr}$ , то можно говорить о росте магнитного поля, в противном случае ( $D < D_{cr}$ ) – оно затухает. Школьники определили значение  $D_{cr}$  для различных аккреционных дисков. Эти результаты соответствуют более сложным моделям, изучавшимся в работах, опубликованных в ведущих научных журналах астрономической тематики.

### 3. Генерация магнитных полей в галактиках и движение космической пыли

Не меньший интерес как с точки зрения «большой науки», так и с позиции школьных исследовательских проектов представляют магнитные поля галактик. Отметим, что с исторической точки зрения модели дискового динамо первоначально были созданы именно для них [22]. В подобных объектах убывание скорости вращения с расстоянием происходит не так быстро, и поэтому моделировать их оказывается в каком-то смысле проще.

Одно из преимуществ планарного приближения, характеризующего действие динамо, является то, что с небольшими изменениями оно может быть воспроизведено для дисковых объектов различной природы. Уравнения записываются в безразмерных единицах,

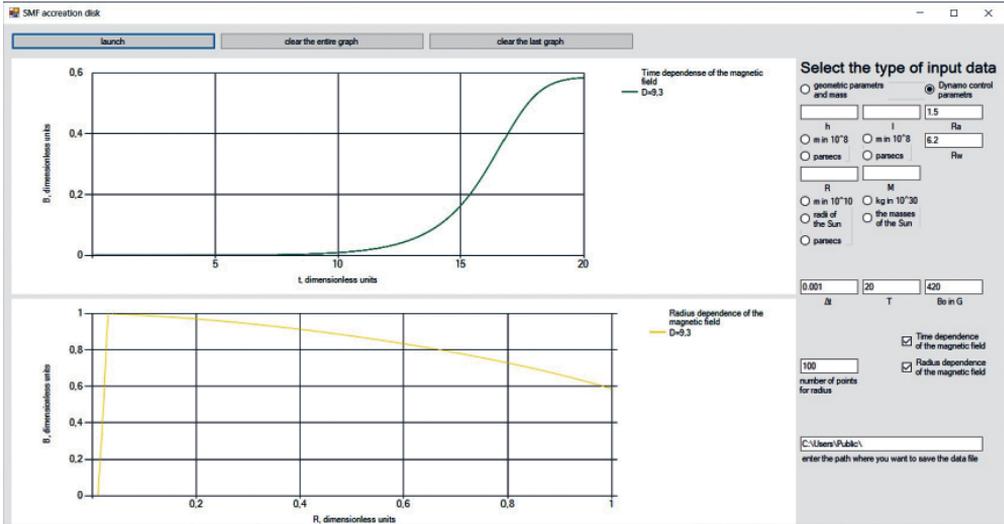


Рис. 5. Интерфейс программы

и в них отличаются лишь некоторые значения коэффициентов, характеризующих дифференциальное вращение и альфа-эффект.

Так, в случае галактик расстояния измеряются в радиусах галактики, который обычно имеет величину около 10 килопарсек (1 парсек (пк) составляет около 3,2 световых лет, или  $3,1 \cdot 10^{16}$  м). Полутолщину галактического диска можно считать равной  $h = 500$  пк, для масштаба турбулентности допустимо принять значение  $l = 100$  пк. Скорость турбулентных движений в случае галактик имеет порядок  $u = 100$  км/с. Тогда единица времени будет составлять величину  $T \approx 0,7$  млрд лет. В качестве единицы для магнитного поля можно выбрать  $10^{-10}$  Э [22].

Учитывая плоскую кривую вращения, уравнение для эволюции магнитного поля в галактике будет выглядеть так:

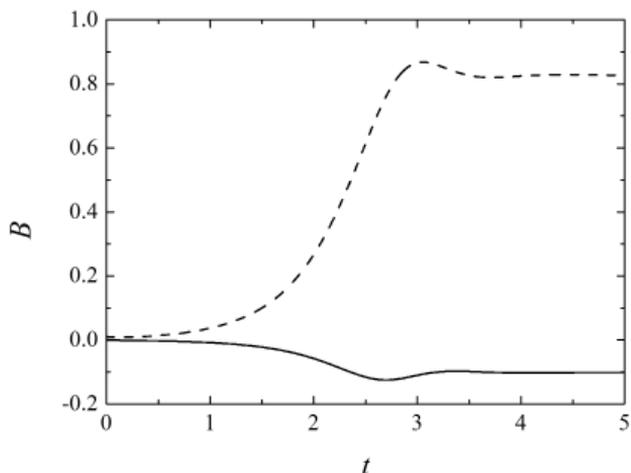
$$\frac{dB_r}{dt} = -R_\alpha B_\varphi \left( 1 - \frac{B^2}{B_{\max}^2} \right) - \frac{\pi^2}{4} B_r;$$

$$\frac{dB_\varphi}{dt} = -\frac{R_\omega}{r} B_r - \frac{\pi^2}{4} B_\varphi.$$

Данная задача решалась в рамках школьного исследовательского проекта с помощью написанной ими компьютерной программы, реализующей численную схему Эйлера. Были получены различные результаты для разных значений параметров, также изучалось влияние магнитного поля на движение космической пыли. Эволюция магнитного поля при  $r = 0,5$  (половина радиуса галактики) для  $R_\alpha = 1$  и  $R_\omega = 10$  показана на рис. 6.

#### 4. Заключение

В ходе нашей работы ученикам Университетской гимназии МГУ имени М. В. Ломоносова и Романовской школы г. Москвы был прочитан курс, включающий необходимые сведения из физики, астрономии, математики, а также программирования. Затем, были сформулированы задачи для исследовательских работ из области космического магнетизма, которые были адаптированы под соответствующий уровень знаний школьников. В исследовательских работах рассматривалась эволюция магнитного поля аккреционных дисков и галактик, которые описываются при помощи



**Рис. 6.** Рост магнитного поля в галактике. Сплошная линия соответствует радиальному полю, пунктирная – азимутальному

механизма динамо. Для решения этой задачи учащиеся составляли собственные компьютерные программы, использующие численный метод Эйлера, который позволяет смоделировать процессы, происходящие в аккреционных дисках и спиральных галактиках. Полученные результаты в пределах точности использованных упрощений соответствуют данным, полученным в современных научных исследованиях по астрофизике [22–24].

Учащиеся, выполнившие указанные исследовательские работы, успешно представили свои работы на Конкурсе имени В. И. Вернадского (Университетская гимназия МГУ), научно-практической

конференции «От атома до галактики» (Физический факультет МГУ), Московском городском конкурсе исследовательских и проектных работ (Департамент образования и науки города Москвы), молодежной конференции «International Avicenna Youth Science Fair» (Иран), выставке «MILSET Expo-Sciences Vostok» (Казахстан). Их доклады были отмечены медалями, дипломами призеров и победителей. Исследовательская деятельность школьников также освещалась в СМИ: на Московском образовательном телеканале вышел сюжет о школьной исследовательской деятельности в области компьютерного моделирования космического магнетизма [25].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Министерства просвещения Российской Федерации от 17 мая 2012 № 413 «Об утверждении Федерального государственного образовательного стандарта среднего общего образования».
2. Леонтович А. В. Научно-практическое образование: теоретико-прикладные аспекты // Народное образование. 2018. № 1–2. С. 97–105.
3. Викторова Л. Г. Инновационные процессы в образовании // Инновации в образовании. 2002. № 2. С. 4–10.
4. Стасенко А. Л. Физика полета. М.: Б-чка «Квант», 1988.
5. Дульнев Г. Н., Тихонов С. В. Основы теории тепломассообмена. СПб.: СПбГУИТМО, 2010.
6. Калиткин Н. Н. Численные методы. М.: Наука, 1978.

7. Алексеева Т. А. Применение пакета Mathcad в школьном курсе математики (решение задач с параметрами) // Вестн. Московского гор. пед. ун-та. Сер.: Информатика и информатизация образования. 2006. № 7. С. 9–12.
8. Рыжиков С. Б. Как бороться с силой трения, или Решение «нерешаемых» задач на компьютере. М.: МЦНМО, 2003.
9. Рыжиков С. Б. Классический опыт Галилея в век цифровой техники. М., МЦНМО, 2008.
10. Рыжиков С. Б. Использование табличного процессора MS Excel для решения физических задач повышенной сложности // Информатика и образование. 2007. № 10. С. 73–78.
11. Михайлов Е. А., Рыжиков С. Б. Исследовательские работы школьников, основанные на численном моделировании // Наука и школа. 2018. № 3. С. 101–105.
12. Михайлов Е. А., Широков Е. В. Исследовательские работы школьников, связанные с компьютерным моделированием в задачах ядерной физики // Наука и школа. 2020. № 4. С. 160–169.
13. Соколов Д. Д. Небесные магниты. Природа космического магнетизма. М.: Альпина нон-фикшн, 2021.
14. Соколов Д. Д. Проблемы магнитного динамо // Успехи физических наук. 2015. Т. 185. № 6. С. 643–648.
15. Бочкарев Н. Г. Магнитные поля в космосе. М.: URSS, 2021. 216 с.
16. Moss D., Sokoloff D., Suleimanov V. Dynamo generated magnetic configurations in accretion discs and the nature of quasi-periodic oscillations in accreting binary systems // Astronomy and Astrophysics. 2016. Vol. 588. A18.
17. Linear polarization in the nucleus of M87 at 7 mm and 1.3 cm / E. Kravchenko, M. Giroletti, K. Hada [et al.] // Astronomy and Astrophysics. 2020. Vol. 637. L6.
18. Шилдт Г. С#: учебный курс. СПб.: Питер, 2003.
19. Михайлов Е. А., Князева К. С. Компьютерное моделирование в механике для школьников. М.: Физ. фак. МГУ им. М. В. Ломоносова, 2022.
20. Кононович Э. В., Мороз В. И. Общий курс астрономии. М.: URSS, 2022. 544 с.
21. Краузе Ф., Рэдлер К.-Х. Магнитная гидродинамика средних полей и теория динамо. М.: Мир, 1984.
22. Moss D. On the generation of bisymmetric magnetic field structures in spiral galaxies by tidal interactions // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1995. Vol. 275, No. 1. P. 191–194.
23. Magnetic fields in the accretion discs for various inner boundary conditions / D. V. Boneva, E. A. Mikhailov, M. V. Pashentseva, D. D. Sokoloff // Astronomy and Astrophysics. 2021. Vol. 652. A38.
24. Михайлов Е. А. Галактическое динамо с учетом потоков спиральности // Письма в Астрономический журнал. 2013. Т. 39, № 7. С. 474–480.
25. Выпуск программы «Школа.Новости» от 21 апреля 2021 г. URL: [https://mosobr.shkolamoskva.ru/uploads/files/video/2021-04-21\\_NEWS\\_19-00\\_VMZ\\_Shkola%20Nov\\_21-04-09-117026-TJK-Pobeditel\\_konkursa\\_bolshie\\_vizovi.mp4](https://mosobr.shkolamoskva.ru/uploads/files/video/2021-04-21_NEWS_19-00_VMZ_Shkola%20Nov_21-04-09-117026-TJK-Pobeditel_konkursa_bolshie_vizovi.mp4) (дата обращения: 20.01.2023).

## REFERENCES

1. Prikaz Ministerstva prosvetsheniya Rossiyskoy Federatsii ot 17.05.2012 No. 413 “Ob utverzhdenii Federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo standart'a srednego obshchego obrazovaniya”.
2. Leontovich A. V. Nauchno-prakticheskoe obrazovanie: teoretiko-prikladnye aspekty. *Narodnoe obrazovanie*. 2018, No. 1–2, pp. 97–105.
3. Viktorova L. G. Innovatsionnye protsessy v obrazovanii. *Innovatsii v obrazovanii*. 2002, No. 2, pp. 4–10.
4. Stasenko A. L. *Fizika poleta*. Moscow: B-chka “Kvant”, 1988.
5. Dulnev G. N., Tikhonov S. V. *Osnovy teorii teplomassoobmena*. St. Petersburg: SPbGUITMO, 2010.
6. Kalitkin N. N. *Chislennye metody*. Moscow: Nauka, 1978.
7. Alekseeva T. A. Primenenie paketa Mathcad v shkolnom kurse matematiki (reshenie zadach s parametrami). *Vestn. Moskovskogo gor. ped. un-ta. Ser.: Informatika i informatizatsiya obrazovaniya*. 2006, No. 7, pp. 9–12.
8. Ryzhikov S. B. *Kak borotsya s siloy treniya, ili Reshenie “nereshaemykh” zadach na kompyutere*. Moscow: MTsNMO, 2003.
9. Ryzhikov S. B. *Klassicheskiy opyt Galileya v vek tsifrovoy tekhniki*. Moscow, MTsNMO, 2008.

10. Ryzhikov S. B. Ispolzovanie tablitsnogo protsessora MS Excel dlya resheniya fizicheskikh zadach povyshennoy slozhnosti. *Informatika i obrazovanie*. 2007, No. 10, pp. 73–78.
11. Mikhaylov E. A., Ryzhikov S. B. Issledovatel'skie raboty shkolnikov, osnovannye na chislenno modelirovanii. *Nauka i shkola*. 2018, No. 3, pp. 101–105.
12. Mikhaylov E. A., Shirokov E. V. Issledovatel'skie raboty shkolnikov, svyazannye s kompyuternym modelirovaniem v zadachakh yadernoy fiziki. *Nauka i shkola*. 2020, No. 4, pp. 160–169.
13. Sokolov D. D. *Nebesnye magnity. Priroda kosmicheskogo magnetizma*. Moscow: Alpina non-fikshn, 2021.
14. Sokolov D. D. Problemy magnitnogo dynamo. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2015, Vol. 185, No. 6, pp. 643–648.
15. Bochkarev N. G. *Magnitnye polya v kosmose*. Moscow: URSS, 2021. 216 p.
16. Moss D., Sokoloff D., Suleimanov V. Dynamo generated magnetic configurations in accretion discs and the nature of quasi-periodic oscillations in accreting binary systems. *Astronomy and Astrophysics*. 2016, Vol. 588, A18.
17. Kravchenko E., Giroletti M., Hada K. et al. Linear polarization in the nucleus of M87 at 7 mm and 1.3 cm. *Astronomy and Astrophysics*. 2020, Vol. 637, L6.
18. Schildt H. *C#: uchebnyy kurs*. St. Petersburg: Piter, 2003. (In Russian).
19. Mikhaylov E. A., Knyazeva K. S. *Kompyuternoe modelirovanie v mekhanike dlya shkolnikov*. Moscow: Fiz. fak. MGU im. M. V. Lomonosova, 2022.
20. Kononovich E. V., Moroz V. I. *Obshchiy kurs astronomii*. Moscow: URSS, 2022. 544 p.
21. Krause F., Rädler K.-H. *Magnitnaya gidrodinamika srednikh poley i teoriya dinamo*. Moscow: Mir, 1984. (In Russian).
22. Moss D. On the generation of bisymmetric magnetic field structures in spiral galaxies by tidal interactions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1995, Vol. 275, No. 1, pp. 191–194.
23. Boneva D. V., Mikhailov E. A., Pashentseva M. V., Sokoloff D. D. Magnetic fields in the accretion discs for various inner boundary conditions. *Astronomy and Astrophysics*. 2021, Vol. 652, A38.
24. Mikhaylov E. A. Galakticheskoe dinamo s uchetom potokov spiralnost. *Pisma v Astronomicheskiiy zhurnal*. 2013, Vol. 39, No. 7, pp. 474–480.
25. Vypusk programmy “Shkola.Novosti” ot 21.04.2021. Available at: [https://mosobr.shkolamoskva.ru/uploads/files/video/2021-04-21\\_NEWS\\_19-00\\_VMZ\\_Shkola%20Nov\\_21-04-09-117026-TJK-Pobeditel\\_konkursa\\_bolshie\\_vizovi.mp4](https://mosobr.shkolamoskva.ru/uploads/files/video/2021-04-21_NEWS_19-00_VMZ_Shkola%20Nov_21-04-09-117026-TJK-Pobeditel_konkursa_bolshie_vizovi.mp4) (accessed: 20.01.2023).

---

**Михайлов Евгений Александрович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики, Физический факультет, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

**e-mail: ea.mikhajlov@physics.msu.ru**

**Mikhailov Evgeny A.**, PhD in Physics and Mathematics, Assistant Professor, Mathematics Department, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

**e-mail: ea.mikhajlov@physics.msu.ru**

**Пашенцева Мария Владимировна**, студентка магистратуры, кафедра математики, Физический факультет, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

**e-mail: pashentseva.mv17@physics.msu.ru**

**Pashentseva Maria V.**, student in the master's program, Mathematics Department, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

**e-mail: pashentseva.mv17@physics.msu.ru**

*Статья поступила в редакцию 24.01.2023*

*The article was received on 24.01.2023*