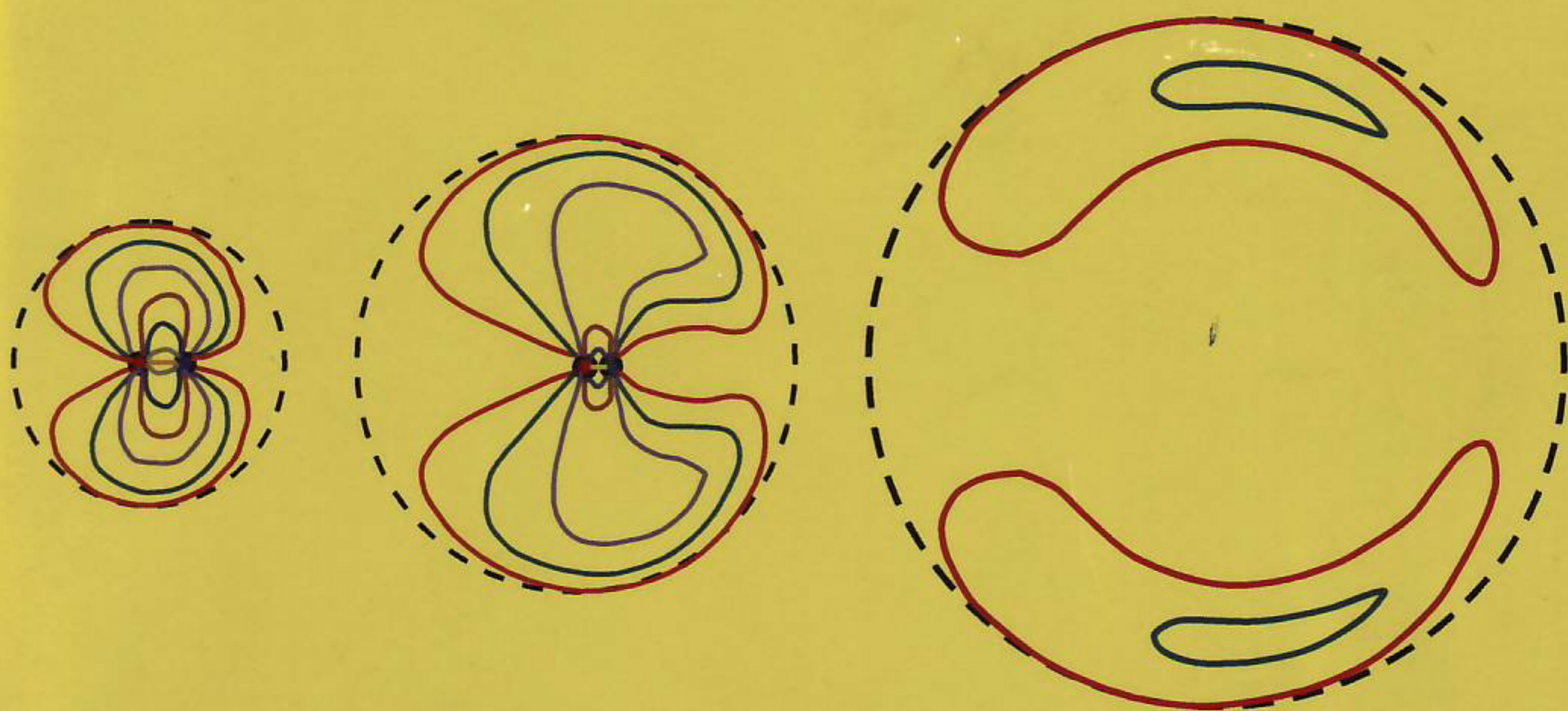


В. А. Мазур, В. Л. Паперный

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ И ПОЛЕЙ В КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ





**В. А. Мазур, В. Л. Паперный**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ И ПОЛЕЙ  
В КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ**

*Учебное пособие*



Москва  
Физматкнига  
2010

УДК 539.1(075.8)  
ББК 22.36я73  
М13

**Мазур В. А.**  
М13 **Взаимодействие частиц и полей в классической физике** : учеб. пособие / В. А. Мазур, В. Л. Паперный. – М. : Физматкнига, 2010. – 223 с.

ISBN 978-5-89155-198-5

*Издание подготовлено при частичной поддержке  
Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры  
инновационной России» на 2009–2013 годы  
в рамках Государственного контракта № 02.740.11.0576  
и Аналитической ведомственной целевой программы  
«Развитие потенциала высшей школы(2009–2010 гг.)»,  
проект РНП. 2.1.1./5955*

В компактном виде изложены основы классической и релятивистской механики, а также классической электродинамики. В основном круг рассматриваемых вопросов сосредоточен вокруг понятия взаимодействия частиц и полей. Обсуждаются вопросы, которые недостаточно подробно или не всегда корректно рассматриваются в современных учебниках.

Для преподавателей физики высшей школы, а также для студентов и школьников, интересующихся современными подходами к изучению физики.

ISBN 978-5-89155-198-5



9 785891 551985

© В. А. Мазур, В. Л. Паперный, 2010  
© «Физматкнига», 2010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие .....</b>	<b>6</b>
<b>Введение. Понятие взаимодействия: от Ньютона до наших дней..</b>	<b>8</b>
<i>Что такое взаимодействие .....</i>	<i>8</i>
<i>Классическая механика: «частица – частица».....</i>	<i>8</i>
<i>Классическая теория поля: «частица – переносчик взаимодействия (классическое поле) – частица».....</i>	<i>11</i>
<i>Классическая физика.....</i>	<i>14</i>
<i>Нерелятивистская квантовая физика: «квант поля вещества – классическое поле – квант поля вещества».....</i>	<i>16</i>
<i>Релятивистская квантовая теория: «квант поля вещества – квантованное поле – квант поля вещества».....</i>	<i>18</i>
<i>Стандартная Модель .....</i>	<i>20</i>
<i>Общая теория относительности .....</i>	<i>22</i>
<i>Конфликт квантовой теории и общей теории относительности ..</i>	<i>24</i>
<i>Планковский масштаб .....</i>	<i>25</i>
<i>Суперструны – основная идея.....</i>	<i>26</i>
<i>Суперструны – скрытые размерности.....</i>	<i>30</i>
<i>Окончательная теория.....</i>	<i>34</i>
<b>Глава 1. Нерелятивистская теория взаимодействия частиц ....</b>	<b>37</b>
<b>1.1. Основы классической механики .....</b>	<b>37</b>
<i>1.1.1. Системы отсчета. Первый закон Ньютона.....</i>	<i>37</i>
<i>1.1.2. Понятие силы.....</i>	<i>40</i>
<i>1.1.3. Второй закон Ньютона .....</i>	<i>42</i>
<i>1.1.4. Взаимодействие тел. Третий закон Ньютона.....</i>	<i>45</i>
<i>1.1.5. Принципы симметрии и законы сохранения .....</i>	<i>46</i>
<i>1.1.6. Общие свойства сил взаимодействия и полей.....</i>	<i>52</i>
<i>1.1.7. Задача двух тел.....</i>	<i>58</i>
<b>1.2. Гравитационное взаимодействие .....</b>	<b>61</b>
<b>1.3. Электростатическое взаимодействие .....</b>	<b>68</b>
<i>1.3.1. Основные понятия.....</i>	<i>68</i>
<i>1.3.2. Электрическое поле покоящихся зарядов .....</i>	<i>71</i>
<i>1.3.3. Электрические поля однородно заряженных прямой и плоскости .....</i>	<i>73</i>
<i>1.3.4. Электростатическое и гравитационное взаимодействия .....</i>	<i>80</i>



<b>Глава 2. Релятивистская механика .....</b>	<b>84</b>
2.1. Скорость распространения взаимодействий и теория относительности.....	84
2.2. Преобразования Лоренца. Релятивистская кинематика .....	86
2.3. Релятивистская динамика .....	93
2.3.1. Преобразование импульса и энергии частицы .....	93
2.3.2. Энергия и импульс системы невзаимодействующих частиц .....	98
2.3.3. Энергия и импульс системы взаимодействующих частиц .....	100
2.3.4. Движение частиц под действием силы. Второй закон Ньютона.....	105
2.3.5. О понятии релятивистской массы .....	109
<b>Глава 3. От электростатики к электродинамике .....</b>	<b>116</b>
3.1.1. Взаимодействие частиц и полей .....	116
3.1.2. Частица в поле заряженного проводника .....	119
3.1.3. Электромагнитное поле проводника с током .....	125
3.1.4. Преобразование продольных компонент электромагнитного поля.....	129
3.1.5. Электромагнитное поле равномерно движущегося заряда .....	131
3.1.6. Взаимодействие движущихся зарядов.....	135
3.1.7. Электрическое поле ускоренно движущегося заряда..	140
3.1.8. От гравистатики к гравидинамике .....	144
<b>Глава 4. Элементы электродинамики .....</b>	<b>149</b>
4.1. Основные понятия электродинамики.....	149
4.1.1. Теоретическая схема электродинамики .....	149
4.1.2. Электрический заряд в электродинамике .....	149
4.1.3. Плотности электрического заряда и электрического тока. Уравнение непрерывности .....	151
4.2. Уравнения Максвелла – основа электродинамики .....	153
4.2.1. Общие свойства уравнений Максвелла .....	153
4.2.2. Решение начальной задачи .....	156
4.2.3. Сила Лоренца. Замкнутая система уравнений электродинамики.....	157
4.2.4. Энергия и импульс электромагнитного поля.....	159
4.3. Постоянное электромагнитное поле и ток в проводниках .....	166
4.3.1. Постоянное электромагнитное поле.....	166
4.3.2. Ток в проводниках. Закон Ома.....	172
4.3.3. Электрическое поле в проводниках .....	176
4.4. Потенциальная и вихревая части электромагнитного поля ....	185

4.4.1. Свойства потенциального и вихревого полей.....	185
4.4.2. Потенциальная часть электромагнитного поля.....	186
4.4.3. Вихревая часть электромагнитного поля .....	188
4.5. Квазистационарное электромагнитное поле.....	190
4.5.1. Уравнения квазистационарного электромагнитного поля .....	190
4.5.2. Закон электромагнитной индукции Фарадея.....	193

**Рекомендуемая литература .....** 199

<b>Приложение 1. Ньютонова космология .....</b>	<b>200</b>
Гравитационный парадокс .....	200
Хаббловское расширение .....	201
Три типа расширения.....	202
Критическая плотность .....	207
Снова о гравитационном парадоксе.....	209

<b>Приложение 2. Уравнения Максвелла как следствие электростатики и теории относительности.....</b>	<b>212</b>
От электростатики к электродинамике – продолжение.....	212
Поток электрического поля через замкнутую поверхность .....	213
Поток магнитного поля через замкнутую поверхность .....	215
Циркуляция магнитного поля по замкнутому контуру.....	217
Циркуляция электрического поля по замкнутому контуру .....	221
Уравнения Максвелла и уравнение сохранения заряда.....	222



## Предисловие

Данное издание – не учебник. Предполагается, что читатель уже изучил физику в ее «традиционном» изложении. Поэтому при подготовке пособия авторы не ставили перед собой задачу последовательного изложения материала, входящего в классический курс физики, или даже какого-либо его раздела. По этой же причине, при выводе формул часто использовался метод аналогий, приводились наглядные, но нестрогие рассуждения. Подробные выкладки мы также, как правило, опускали, в случаях же, когда из методических соображений, они включались в текст, то выделялись петитом.

Задачи этого издания другие. Во-первых, авторы старались показать, что физика – единая наука, поэтому здесь нет традиционного деления материала на «механику», «электричество» и т. д., а, например, статические поля (гравитационное и электростатическое) рассматриваются совместно. При этом прекрасно представляя, что физика – наука экспериментальная, в изложении материала мы старались избегать выражения «как показывает опыт», частое использование которого создает у читателя представление о физике, как простой совокупности экспериментальных фактов. Напротив, мы полагаем, что современная физика базируется на очень *небольшом* числе фундаментальных законов («первых принципов»), полученных путем обобщения результатов эксперимента, в то время как основной массив физических понятий и соотношений является лишь следствиями этих законов. По этой причине, например, в качестве основы описания всего комплекса электромагнитных явлений мы поставили именно уравнения Максвелла.

Во-вторых, нам хотелось продемонстрировать некоторые современные подходы к изложению физики, так описание и гравитационного и электромагнитного типов взаимодействия основано на последовательно полевых представлениях; вывод законов сохранения в механике основан на использовании принципов симметрии и т. д. Далее мы обсуждали используемые в ряде учебников, на наш взгляд, физически некорректные понятия (например, «релятивистской массы») или формулировки, (скажем, второго закона Ньютона). Кроме того, мы считали необходимым рассмотреть некоторые фундаментальные физические представления, которым уделяется совершенно недостаточное внимание в большинстве учебников. К ним относятся, например, эквивалентность инертной и гравитационной масс, принципиально релятивистский характер магнитного взаимодействия зарядов и др. Детально обсуждались области применимости известных физических законов, чему, на наш взгляд, также обычно уделяется недостаточное внимание. Наконец, авторы в ряде случаев придерживались нетрадиционного изложения извест-

ного материала, преследуя цель взглянуть с необычной точки зрения на рассматриваемое явление и даже, в некоторой степени, удивить читателя.

Изложенный материал посвящен лишь одному, но исключительно важному аспекту физики – проблеме взаимодействия физических объектов, которые здесь названы «частицами». Этот термин используется в широком смысле, именно под частицами мы понимаем объекты различных размеров, от электронов до галактик, в зависимости от масштаба задачи. Мы рассмотрим также взаимодействие объектов, состоящих из больших совокупностей частиц, однако при этом будем интересоваться только их усредненными макроскопическими параметрами. Взаимодействие рассматривается с последовательно полевой точки зрения, при этом мы ограничимся лишь «классическими» полями, изучаемыми в общих курсах физики: гравитационным и электромагнитным.

Весь материал разбит на четыре главы. В первой рассмотрено взаимодействие неподвижных, или медленно, по сравнению со скоростью света, движущихся частиц, когда можно пренебречь конечностью скорости распространения их взаимодействия. Переход от электростатического к электромагнитному взаимодействию движущихся заряженных частиц, которое носит принципиально релятивистский характер, требует изложения основ релятивистской теории, что сделано в Главе 2. Далее, в Главе 3, мы попытались «на пальцах» показать, каким образом можно осуществить этот переход, используя лишь уравнения электростатики и принципы симметрии, т. е. инвариантность соотношений релятивистской механики относительно преобразования Лоренца. Наконец, в Главе 4 рассмотрены некоторые, на наш взгляд, наиболее интересные вопросы классической электродинамики движущихся зарядов. В Приложения вынесены вопросы, выходящие за рамки основного материала, однако представляющие самостоятельный методический интерес.

Авторы вполне осознают, что излагаемый материал, в основном, в том или ином виде изложен в различных учебниках, монографиях, статьях. Тем не менее, мы считали полезным собрать его в одном месте, изложив в едином ключе и снабдив подробными комментариями. Полагаем, что данное издание будет полезно, в первую очередь, преподавателям физики средней и высшей школы, желающим расширить свой методический багаж, а также студентам и «продвинутым» школьникам, неформально интересующимся великой наукой Физикой.

Авторы признательны С. М. Козелу и Г. Р. Локшину за поддержку издания. С. И. Синеговский и А. В. Гайнер прочитали пособие в рукописи и сделали ряд полезных замечаний, за что авторы весьма им благодарны.