

Содержание

Предисловие	9
К уравнению всего	12
Красивые уравнения.....	13
Уравнение свободы.....	14
Глава 1 Закон отражения света	17
Но что такое отражение?	21
Кстати, что значит «видеть»?	22
Физика освещения	23
Глава 2 Закон Снелла–Декарта и... принцип наименьшего действия	25
Эксперимент	29
Чей это закон?	29
Когда свет не теряет времени.....	30
Принцип наименьшего действия	31
Формула, которая обобщает все?.....	32
Глава 3 Главный принцип динамики (второй закон Ньютона)	35
Идеальный, потому что неподвижный (?).....	39
От фонтанов до планет	39

	Немного ностальгии по утраченной γ	40
	Довольно динамичная физика.....	42
Глава 4	Закон всемирного тяготения (классическая теория тяготения Ньютона)	45
	Нелюбимое уравнение	49
	Слишком просто для закона?	49
	Закон... скрывающий невежество?.....	50
	E pur, si muove!	51
	Космический хаос	53
	Планетарная игра в бильярд.....	55
Глава 5	Уравнение состояния идеального газа	57
	Идеальный воздух.....	59
	Как же нам повезло!	61
	Воздух или закон?	62
	Удивительная гипотеза.....	63
	Измерение размера атомов путем продувки воздухом	65
	Революционная гипотеза	66
Глава 6	Закон Гука	69
	Физика промышленной революции	71
	Упругий, как металл	74
	«Механическая сила огня»	74
	Тепло, движение, энергия	75
Глава 7	Уравнение Навье–Стокса	79
	Физики на поле битвы.....	83
	Уравнение, которое трудно покорить... ..	84
	От фанерных моделек до суперкомпьютеров	86

Глава 8	Уравнения Максвелла	89
	Творческие уравнения	93
	Библия электромагнетизма	94
	Хитрый Z^0	96
Глава 9	Эквивалентность материи и энергии	99
	Между уважением и трепетом	101
	Странные отношения между пространством и временем	103
	Верить по-настоящему... ..	104
	Энергия Солнца.....	105
	...и атомной бомбы	107
Глава 10	Уравнение Шредингера	111
	«Пси» – это «психо»?.....	115
	Первое квантовое головокружение.....	117
	Этот контринтуитивный мир... ..	119
	Множество приложений	120
Глава 11	Соотношение неопределенностей Гейзенберга	123
	Основа квантовой неопределенности.....	125
	Этот несовершенный мир.....	127
	Но наш повседневный мир остается точным!	128
	Совершенно чистая случайность	129
	Действующий, но загадочный «механизм» ...	130
	Прогресс как устаревшая концепция?.....	131
Глава 12	Уравнение Эйнштейна и общая теория относительности	135
	Доминирующие эффекты для космологии ..	137

	Описание всей Вселенной	140
	Расширение и Большой взрыв	141
	Эволюция Вселенной.....	142
	Черные дыры: лаборатория...	
	в воображении	143
	Здесь и сейчас	144
Глава 13	Уравнение Дирака	147
	И Дирак создал антиматерию	149
	Уравнение должно делать свое дело	152
	Полностью физическое решение.....	153
	Антиматерия существует!	154
	Веруя в уравнение	155
Глава 14	Диаграммы Фейнмана	157
	Тяжелейшие расчеты... ..	161
	Небольшая схема для длительного расчета	162
	Мощный язык	164
	Сны о диаграммах Фейнмана.....	166
Глава 15	Стандартная модель.....	169
	В кафетерии ЦЕРНа	171
	Лагранжиан возвращается	174
	Охота на Хиггса.....	176
	Яркое подтверждение	177
Эпилог	Ограничения Стандартной модели... и физика будущего	181
	Неужели стандартная?	183
	Но где же гравитация?	187
	Окончательное уравнение?	189
Именной указатель		191

Предисловие

Я простой ученый в области физики элементарных частиц, которую скорее следует назвать «фундаментальной физикой». Цель моей работы – изучить и понять фундаментальные составляющие нашего мира и характер их взаимодействий от мельчайших частиц до самых больших структур Вселенной.

В данной книге я хотел бы, насколько это возможно, познакомить малоподготовленных читателей с уравнениями физики. В первую очередь я имею в виду тех, кто никогда не сталкивался с уравнениями, выражающими физические законы, или тех, для кого начальные встречи с этими законами были разочаровывающими или даже травмирующими.

Мы, физики, одновременно видим мир таким же, как его видят все, но, с другой стороны, мы наблюдаем и действительную природу вещей благодаря знанию законов физики, выраженных уравнениями. Широкая публика легко признает подобную двойственность для музыканта: музыкант – художник, но он также владеет широкими музыкальными теоретическими знаниями и обладает сильной технической подготовкой. Физики же обычно изображаются как потерянные в своих уравнениях и отключенные от реальности социопаты.

Действительно, бóльшая часть научного знания – это законы, выраженные уравнениями. Но как это не покажется странным, использование уравнений может стать настолько привычным, что видение мира «через формулы» и обычное видение сольются воедино.

Позвольте мне привести пример. Когда я смотрю на радугу, то забываю законы преломления света. Как и все остальные, я восхищаюсь красотой пейзажа, которая подчеркнута радугой. Но «все живое отбрасывает тень»; за красотой радуги стоит целый набор знаний о природе света, его распространении, который безмолвно совмещается с моим видением радуги. Точно так же, как музыкант наслаждается пьесой, которую слушает, не осознавая ее ключа, типа аккордов и структуры ритма. Конечно, если вы вдруг спросите

его об этом, он обязательно даст точные и исчерпывающие ответы на все вопросы и... – это никак не повредит восприимчивости им музыки.

К уравнению всего

Выбор уравнений и соответствующих физических законов в этой книге может показаться профессиональным физикам или физикам-любителям произвольным. Обоснование моего выбора состоит в том, что каждое из приведенных уравнений является запечатленным свидетельством научной эволюции, а иногда даже настоящей революции.

Каждое из них демонстрирует особое понимание мира или явления: света, материи, тепла и т. д. Сформулированные на заре той эпохи, когда физика начала использовать математику, первые законы весьма скромны и ограничены на первый взгляд такой узкой областью применения, как законы отражения и преломления света. Амбиции растут: цель состоит в том, чтобы описать универсальным образом все более расширяющийся круг понятий и явлений. Таким образом, Ньютон понял, что притяжение между Землей и Луной идентично силе, которая заставляет яблоко упасть с дерева. Точно так же Максвелл объединил электричество и магнетизм, а современная физика и химия объясняют, как все химические элементы построены из протонов, нейтронов и электронов. В начале XX в. теория относительности и квантовая механика подвергли сомнению сами понятия «пространство», «время» и «материя», прежде чем космология окончательно использовала в качестве предмета исследования всю Вселенную. Сегодня одержимость физиков элементарным заставляет их пытаться объединить все известные законы мироздания в единую «минимально достаточную» теорию. Как мы увидим в конце этой книги, современная формулировка физической теории материи, пространства и времени в идеале должна содержаться в одном уравнении. Именно по этой причине часто говорят, что физики ищут

«уравнение всего». Конечно, такая идея является несколько упрощенной, но как будет выглядеть конечное уравнение? У меня нет ответа. Однако на примерах, приведенных в книге, я хотел бы поделиться с вами самим ощущением от соприкосновения с поиском столь элегантно и мощной формулы, которая способна помочь нам понять этот мир.

Красивые уравнения

Законы физики могут вызывать как уважение, восхищение, так и страх. Даже если человек никогда не занимался научными исследованиями или же настроен против всех форм математики, он, несомненно, знает, что $E = mc^2$, и смутно связывает эту формулу с огромной силой ядерной энергии. В глазах общественности уравнения выглядят холодными и бесчеловечными символами силы науки.

Когда я выступаю перед широкой публикой, одно из первых требований, которые приходится слышать от организаторов: «никаких уравнений, пожалуйста!» Отвечая им заочно, замечу, что некоторые уравнения довольно просты, так как показывают обычное отношение пропорциональности или прямую зависимость одной величины от другой. Понимание смысла таких уравнений даже для неподготовленного человека окажется не сложнее понимания инструкции к коробочке подключения к интернету. Увы, для среднестатистического организатора публичных конференций или обыкновенного журналиста появление уравнений означает просто исчезающую аудиторию.

Все слушатели, находящиеся в аудитории, знают, что науки и математика, которые им служат, применимы в различных аспектах нашей жизни, что самолет или смартфон были разработаны и построены инженерами, которые руководствовались в своих опытах соответствующими уравнениями. Однако люди предпочитают игнорировать данное правило и оставляют эти не столь привлекательные инструменты ученым и инженерам.

Я полагаю, что недоверие к математике как науке вообще и математике в физических законах в частности имеет более глубокие основания, чем простое отвращение к формулам. Уравнения ограничивают нас своего рода интеллектуальной дисциплиной. Сегодня они не говорят ничего противоположного тому, что говорили совсем недавно. Они проясняют наше мышление, позволяя избегать неопределенности, когда мы с кем-то разговариваем. Эта интеллектуальная дисциплина может быть тревожной: неопределенность иногда так удобна...

Я не утверждаю, что уравнения физики «истинны», а говорю, что они «никогда не лгут». Когда я пишу формулы, выражающие законы механики Ньютона, описывающие начиная с XVII в. движение небесных тел, артиллерийских снарядов и каруселей, то не претендую на то, чтобы объяснить загадки мироздания, например такие, почему светит солнце, почему растут цветы или почему у меня болит голова.

Но эти уравнения предлагают мне последовательную и точную модель, набор отношений между наблюдаемыми положениями планет или между силами, которые я чувствую на американских горках. Тогда я волен разумно применить данную модель к объектам и явлениям, которые считаю принадлежащими к области ее действия. Я мог бы даже проверить пределы достоверности предсказаний модели, провести измерения, эксперименты или просто мысленно исследовать следствия этих уравнений: описывают ли они мир на очень малых или очень больших расстояниях?

Уравнение свободы

Я часто даю студентам следующие рекомендации: «дело не в том, чтобы знать все. Суть в том, чтобы знать то, что ты знаешь, и понимать, чего ты не знаешь».

В этом смысл хорошего физического уравнения: оно суммирует известное в определенной области. Его переменные

определяют объекты и понятия, о которых мы говорим, не больше и не меньше.

Ключевое слово – «свобода». Это может показаться парадоксальным, но однажды написанное уравнение не ограничивает нашего видения мира, а наоборот, расширяет его. Тем самым мы выбираем определенное видение части мира. Этот выбор может быть свободно принят и часто основывается на консенсусе или какой-либо договоренности. Вместе мы определяем общий язык и соглашаемся, что часть явлений в мире, связанных между собой, может быть описана уравнением. Теперь мы готовы двигаться вперед, использовать модель в ее области применения для исцеления людей или производства смартфонов и открывать мир за пределами этой области. Описав некое явление уравнением, мы больше не рискуем запутаться в сложных определениях, принимая частные случаи за общие или позволяя другим диктовать нам наше видение мира.

Вот тебе и рациональная часть. Но уравнения также содержат эмоциональный аспект. Некоторые из них привлекательны благодаря своему внешнему виду, даже если кто-то не понимает их математического или физического смысла. Чувственные изгибы оператора ∂ , агрессивная стрелка над переменной \vec{p} или двусмысленная стрелка \vec{d} ...

Некоторые – по эlegantности используемых ими концепций.

Некоторые – своей силой и масштабом последствий.

Некоторые – с более личной точки зрения: кто научил нас этому, кого мы научили и т. д. Момент, когда мы впервые увидели уравнение в классе или книге, и соответствующий период в нашей личной жизни. В этом отношении оно изменяет наше видение мира.

Внутренние пространства, которые оно вызывает..., мечты, которые оно зажигает...

Глава 1

Закон отражения света

$$\theta_r = -\theta_i$$

Приведенная формула описывает поведение луча света при встрече его с отражающей поверхностью, такой как поверхность озера или зеркала. Он был предложен Евклидом в III в. н. э.

Этот закон настолько прост, что его можно легко сформулировать без помощи уравнения: луч света, отраженный зеркалом, проходит от точки падения входящего луча на поверхность зеркала симметрично входящему лучу относительно перпендикуляра к зеркалу. Однако получение «объяснения» того, как возникает отражение, уже требует обращения к фундаментальным основам мироздания – это не эволюция, а революция! До того, как узнать об этом законе, я «видел» предмет и его отражение в воде озера, не задавая себе никаких вопросов. Зная закон отражения света Евклида, понимаешь, что одна часть того, что я вижу (отражение), «внезапно» оказывается строго связана с другой (отраженным объектом). Чтобы понять данное отношение, необходимо поставить под сомнение самый смысл понятия «видение»!

Повсюду можно увидеть отражение света: в природе, на поверхности воды или на отполированных камнях; в городе на окнах, на металлических поверхностях и т. д. Почти все, что мы видим, включает в себя отражение здесь и там, так что его устранение требует некоторых сложных технологий: например, антибликовое покрытие экранов, очков или объективов камер.

$$\theta_r = -\theta_i$$



Но что такое отражение?

Мы обычно не задумываемся о законах отражения света. Мы никогда не спрашиваем себя: почему появляется отражение? Мы начинаем думать об этом только тогда, когда выполняем чертеж, или рисуем, или хотим создать изображение на компьютере.

В естественной среде, такой как пейзаж, единственными источниками света являются солнце или звезды. Я вижу гору или дерево, потому что лучи света, испускаемые солнцем, попадают на этот объект и снова испускаются, или «переизлучаются», поверхностью объекта в мои глаза. Часть солнечных лучей поглощается, часть рассеивается во всех направлениях: эти сложные процессы приводят к появлению у каждой вещи более темных и более светлых оттенков цветов — все это будет объяснено позднее.

Но случай отражения самый простой из всех вариантов взаимодействия света с предметом: луч света, который падает на отражающую поверхность, оставляет ее симметрично входящей траектории, так же, как мяч, брошенный в стену. Если бросить мяч перпендикулярно стене, он отскочит к нашей руке. Чем больше угол встречи мяча со стеной, тем дальше он будет отскакивать от нас. Это именно то, что написано в уравнении в начале данной главы: символами θ_i и θ_r обозначаются углы падающих (i – *incident* (входящий, англ.)) и отраженных (r – *reflected* (отраженный, англ.)) лучей света.

Как только этот закон сформулирован, появляется возможность «объяснить», почему я вижу отражение горы в озере: гора освещена солнцем и «переизлучает» лучи его света во всех направлениях. Некоторые из лучей, испущенных горой, попадают непосредственно мне в глаза: я вижу гору. Но другие лучи достигают моих глаз, после того как были отражены поверхностью озера: я вижу отражение горы. Приведенное выше уравнение и немного геометрии позволяют понять, что отраженные лучи света формируют образ горы,

симметричный прямому изображению относительно поверхности озера.

Это выглядит совершенно обычным. Все художники понимают, как получить отражение, благодаря интуиции и наблюдениям. Да, объяснение того, как получается отражение, – еще не революция! Конечно, это всего лишь частичное «объяснение»: оно описывает только отражение света, но не цвета объектов, диффузию или рефракцию.., и не говорит, почему некоторые поверхности отражают, а другие – нет. Однако этот небольшой шаг фундаментален: никогда не думайте об увиденном как о «совершенно обычном» или «необъяснимом», подвергайте сомнению даже самые знакомые слова, такие как «видеть» или «наблюдать». Пробуйте интерпретировать, находить связи, используя простые законы, даже ценой глубокого переворота в сознании.

Кстати, что значит «видеть»?

Мне несказанно повезло с учителями физики. В старшей школе, в 11-м классе, учитель оказался не просто преподавателем, а еще и любителем своего предмета. Он создал реальную лабораторную установку для выполнения деликатных оптических экспериментов: не во время лабораторных работ, а перед всем классом, как живое шоу. Для экспериментов с оптикой мы выключали свет в классе, учитель зажигал дуговую лампу, потрескивающую и упрямую (в то время еще не было лазеров, что значительно облегчило бы ему жизнь...). Затем преподаватель вводил в луч света линзы или щели, вращал зеркала, и лучи света пронизывали стены класса странными, эфемерными фигурами, которые он поощрял нас расшифровывать. Его изобретения почти всегда срабатывали. Великое искусство!

Но перед столь впечатляющими демонстрациями учитель тратил половину урока, объясняя, что «видеть» – это не значит активно «смотреть», а данное понятие подразумевает

пассивное восприятие световых лучей¹. Один полноценный урок был посвящен уничтожению той самой интуиции, такой естественной и такой сильной, которая скрывается в глаголе «наблюдать». Не взгляд достигает объекта, а свет, излучаемый им, достигает моих глаз. И кстати, нельзя «почувствовать чей-то взгляд». Я могу только осознать, что девушка смотрит на меня, когда вижу, что ее глаза направлены в мою сторону. Но если я не увижу ее глаз, то никогда не узнаю, направлен ли ее взгляд «на меня» или в другое место.

Казалось бы, нет ничего проще. Однако мне это запомнилось как одно из самых первых откровений научного мышления. Действительно, есть два способа увидеть мир. В первом «я смотрю» и «я вижу» предметы и их отражения, никак не интересуясь природой этого видения. В другой парадигме восприятия источник света, лампа, солнце испускают световые лучи. Они отражаются, преломляются, рассеиваются предметами, затем попадают в мои глаза, и только тогда я их вижу.

Физика освещения

Итак, давайте «делать физику». Это значит оставлять наивную интуицию в стороне, судить обо всем на основании фактов, вносить новые смыслы в мир. И желательно делать это так, чтобы новые интерпретации известных фактов были понятны для всех. Отставляя в сторону свое «я», несложно сформулировать законы, выразив их формулами. Теперь мы можем вычислять и предсказывать. Каждый источник света излучает лучи, которые отражаются, преломляются, рассеиваются на объектах одинаково для всех. Законы отражения и преломления света возвестили век «просветления» и новую эру формул в физике.

¹ Евклид сформулировал закон отражения правильно, однако ошибался относительно направления распространения света, – он был уверен, что лучи «света» испускаются глазами!