

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ЛЮДВИГ БОЛЬЦМАН*)

Н. Н. Боголюбов и Ю. В. Саночкин

50 лет отделяет нас от дня трагической гибели одного из величайших физиков XIX века, автора фундаментальных исследований по кинетической теории газов, термодинамике и теории излучения, убежденного и страстного борца за атомистические взгляды в науке — Людвигу Больцману.

Имя Больцмана неразрывно связано с обоснованием и развитием статистической физики: он открыл фундаментальный закон стационарного «больцмановского распределения», который красной нитью проходит через все отделы статистической физики, ему принадлежит статистическая интерпретация второго начала термодинамики и знаменитая *H*-теорема, которые легли в основу теории необратимых процессов; он является автором кинетического уравнения, на базе которого выросла современная физическая кинетика. Он автор одного из законов излучения абсолютно черного тела, приведших к «ультрафиолетовой катастрофе» классической физики, устранение которой привело в свою очередь к теории квантов.

Судьбу Людвигу Больцмана как одного из основоположников современной физики можно только сравнить с судьбой великого творца теории множеств — Георга Кантора. Идея их обоих не были поняты и оценены надлежащим образом при жизни авторов, что трагически сказалось на судьбах этих гениальных людей. Но творения их поняты и оценены последующими поколениями, взошли бурным урожаем на научной ниве физики и математики, и как нельзя себе мыслить сегодня современной математики без методов теории множеств, без методов трансфинитного, создателем которых является Георг Кантор, так и нельзя мыслить себе современной физики без статистических методов, основоположником и ревностным пропагандистом которых является Людвиг Больцман.

Родился Больцман 20 февраля 1844 г. в Вене. Его отец, финансовый комиссар, рано умер. Брат Альберт, бывший по свидетельству современников также высокоодаренным юношей, умер, будучи еще учеником гимназии, от туберкулеза легких. У Больцмана была еще сестра Хедвиг, жизнь которой также оборвалась рано и трагически — помрачением разума. Курс гимназии окончил Больцман в Линце и в 1863 г. поступил в Венский университет. Здесь в знаменитом университете Больцман слушал Стефана.

Уже в то время у Больцмана сложились тесные и дружественные отношения с Лешмидтом, оказавшим большое влияние на формирование научных интересов Больцмана. В студенческие годы появляется его первая работа «О движении электричества на изогнутых поверхностях» (1865 г.) и год спустя — вторая «О механическом значении 2-го закона теории тепла». Из названий этих двух первых работ видны две области физики, на которые

*) Доклад, прочитанный 5 сентября 1956 г. на заседании Отделения физико-математических наук АН СССР, посвященном 50-летию со дня смерти Людвигу Больцмана.

Больцман благодаря влиянию учителей и друзей — Стефана и Лошмидта направил свое внимание: кинетическая теория газов и максвелловская теория электромагнитного поля.

Сам Больцман рассказывал, что на его вопрос о том, что он должен изучать, чтобы «войти» в учение об электричестве, Стефан дал ему английскую грамматику, которая должна была открыть Больцману доступ к работам Максвелла. Теория Максвелла произвела на Больцмана огромное впечатление.

Больцман интересовался искусством. Многие его работы снабжены поэтическими эпиграфами. Особенно отмечал Больцман влияние на него Шиллера: «Без Шиллера мог, конечно, быть человек с моим носом и бородой, но это не был бы я».

Получив в 1866 г. в возрасте 22 лет докторскую степень, Больцман занимает год спустя должность приват-доцента физики в Венском университете; до этого он был ассистентом Стефана.

В 1869 г. он переехал в Грац на должность профессора теоретической физики. Это время было периодом расцвета его научной деятельности, когда он выполнил наиболее фундаментальные свои исследования.

В Граце Больцман оставался до 1873 г., причем в 1871—1872 гг. бывал по одному семестру в отпуске, который проводил в Гейдельберге и Берлине. Во время этих поездок он сблизился с математиком Кенигсбергом, физиками Кирхгофом и Гельмгольцем, химиком Бунзеном и познакомился с Софьей Ковалевской. К этому времени Больцман был уже автором ряда крупных работ, и имя его стало приобретать известность. В 1873 г. к Больцману перешла кафедра его учителя математики Мота в Венском университете, однако в 1876 г. он снова возвращается в Грац профессором экспериментальной физики. К этому времени он был уже автором знаменитой *H*-теоремы и основного газокинетического уравнения. В том же году Больцман женился на Генриетте фон Айгентлер, после чего прожил безвыездно в Граце целых 14 лет. Единственным заметным событием за это время было его приглашение по совету Кирхгофа в Берлинский университет, которое он отклонил.

В 1890 г. Больцман оставляет Грац и переезжает в Мюнхен, где занимает кафедру теоретической физики до 1894 г. В этом году умирает Стефан, и Больцман наследует кафедру своего учителя в Венском университете.

В 1900 г. он переезжает в Лейпциг, где занимает кафедру теоретической физики, однако через 2 года снова возвращается в Вену. Последние годы его жизни прошли в Вене, где он читал лекции по физике и натуральной философии.

5 сентября 1906 г. трагическая смерть сорвала его жизнь.

Научное наследие Людвиг Больцмана чрезвычайно богато. Его оригинальные произведения изданы в трех томах (1909 г.). Кроме того, он оставил ряд курсов, из которых наиболее фундаментальным является курс «Лекции по теории газов». В этих лекциях систематически изложены его фундаментальные результаты по кинетической теории материи и статистической физике. Среди его курсов следует также отметить «Лекции по максвелловской теории электричества и света», прочитанные в Мюнхене и изданные в 1891—1893 гг., в которых он активно популяризировал новое еще тогда учение Фарадея и Максвелла об электричестве и магнетизме. Ему принадлежат также лекции «Принципы механики», отличающиеся глубиной подхода, и (совместно с его учеником Наблом) статья «Кинетическая теория материи» и «Энциклопедии математических наук».

Методологические взгляды Больцмана нашли свое выражение в его многочисленных публичных лекциях и выступлениях.

Только теперь, спустя полвека, мы в состоянии оценить значение его вклада в науку, ибо достижения ученого оцениваются не только его фактическими результатами, но и результатами последователей, работавших и разви-

вавших его идеи. Чем выше и шире здание, выросшее на фундаментальных идеях ученого, тем ценнее его вклад.

В своих теоретических работах Больцман был прежде всего страстным и убежденным сторонником молекулярной теории. Представление о том, что макроскопические материальные тела не являются непрерывной средой и состоят из громадного числа мельчайших частиц, восходят, как хорошо известно, еще к Демокриту. Но только в XIX веке это представление привело к созданию законченной физической теории — кинетической теории материи и статистической физики. Именно Больцману и принадлежат фундаментальные идеи, завершающие эту линию развития.

Первоначально основной идеей кинетической теории материи было молекулярно-кинетическое толкование первого начала термодинамики — закона сохранения энергии. Затем, во второй половине XIX века, в 1859 г., Максвелл открывает равновесное распределение газовых молекул. Больцман в 1868—1875 гг. обобщает результаты Максвелла на газы, находящиеся во внешнем силовом поле. Таким образом, он приходит к формуле «равновесного больцмановского распределения», ставшей впоследствии основой всей классической статистической физики.

Чтобы понять ту трудную обстановку, в которой приходилось творить великому физика, ту напряженную идейную борьбу, которую он вел, необходимо учесть положение, создавшееся в физике в конце прошлого столетия.

Расцвет его научного творчества приходится на период господства сторонников теории «чистого описания». Классическая физика, развивая идеи Ньютона и Декарта, стремилась быть продолжением механики и все явления пыталась сводить к механическому движению. Например, всеобщий закон сохранения и превращения энергии был воспринят и понят большинством физиков чисто механически, как следствие известной теоремы механики, если принять, что тепловые и другие явления имеют механическую природу. Иначе обстояло дело со 2-м началом термодинамики, констатирующим необратимость всех реальных процессов. 2-е начало формулировалось как обобщение опыта, причем его физический смысл оставался невыясненным, так же как и пределы применимости. Как вывод, основанный на прямолинейном применении 2-го начала ко всей вселенной, получался закон рассеяния энергии и как его следствие — «тепловая смерть» вселенной. Это последнее обстоятельство и породило затруднения классической механистической физики. Если бы все физические явления можно было свести к механическим, то остался бы совершенно необъяснимым закон рассеяния энергии. Отсюда и получило начало столь нашумевшее противопоставление «энергетического» (вообще феноменологического) и механического мировоззрений.

Энергетисты (вообще сторонники «чистого описания») утверждали, что задачей науки и теории должно быть по возможности простое описание явлений. Теория должна быть математическим выражением отношений, данных непосредственно в опыте. При этом теория должна отказаться от гипотез, модельных представлений, от попыток объяснения явлений, сведения их к наименее сложным. По самому духу своего построения феноменология приписала 2-му началу универсальность и абсолютную верность. Выдвинутое же Больцманом статистическое толкование 2-го принципа термодинамики открывало широчайшие возможности для слияния термодинамики с атомистикой. Следует напомнить, что атомистическая гипотеза не пользовалась популярностью в научном мире, ибо в те времена прямых экспериментальных доказательств в пользу атомистики еще не было и Больцману приходилось всю свою жизнь защищать атомистику от бесчисленных нападок. «Я являюсь последним, который думает отрицать возможность построения иной, нежели атомистической картины природы», — с горечью пишет он в своих «Принципах механики». Один из глашатаев феноменологии Оствальд только в 1908 г., спустя 2 года после

смерти Больцмана, открыто признал существование атомов и молекул, под влиянием прямых экспериментов.

Остановимся несколько подробнее на методологических воззрениях Больцмана.

Своеобразие философских и методологических принципов, которые защищал Людвиг Больцман, в значительной мере определило необычную судьбу его творчества. Он был членом главных Академий Старого и Нового света. Ряд университетов избрал его почетным доктором. И однако в конце жизни взгляды его были объявлены антинаучными, а сам он — ученым «старой школы». Чтобы иметь представление о создавшейся ситуации, достаточно привести высказывание одного немецкого журнала (1898 г.) по поводу выхода в свет ныне классической книги Больцмана «Лекции по теории газов». Этот журнал писал (цитата приведена в произведениях М. Смолуховского, т. III, стр. 61): «Теория кинетическая, как известно, так же ошибочна, как и разные механические теории гравитации, в частности она ошибочно понимает принцип сохранения энергии: если однако кто-либо захочет с ней познакомиться, пусть возьмет в руки книгу Больцмана».

По поводу этого высказывания великий ученик Больцмана польский физик Мариан Смолуховский говорит: «Весьма поучительно следить за изменчивыми судьбами научных теорий. Они более интересны, чем изменчивые судьбы людей, ибо каждая из них включает в себе что-то бессмертное, хотя бы частицу вечной истины».

В речи «О значении теории» Больцман пишет: «Я держусь мнения, что задача теории заключается в конструировании существующего в нас отражения внешнего мира, которое должно служить путеводной звездой во всех наших мыслях и экспериментах. Своеобразие человеческого духа заключается именно в том, что он стремится себе создать такое отражение и все более и более приспособлять его к внешнему миру... В нашем смысле Колумб, Р. Майер и Фарадей — чистейшие теоретики, так как не поиски практической пользы, а отображение природы в их уме служило им руководящей целью. Выработка и постоянное усовершенствование этого отображения и является главной задачей теории».

В другой статье находим: «Мы заключаем относительно существования всех вещей только из впечатлений, которые они производят на наши органы чувств».

В статье «Математика об энергетике» Больцман пишет: «Недоверие к выведенным из непосредственных чувственных восприятий представлениям вообще привело к крайности, противоположной прежнему наивному верованию. Говорят — нам даны лишь чувственные восприятия, поэтому нельзя делать ни одного шага дальше». И далее: «Если мы не хотим притти к выводу, что вообще существуют лишь представления, которые я имею в данный момент, и ничего больше, что опровергается уже пользой знания для практической деятельности, то необходимо признать за нами, при всей осторожности, и способность на основе восприятий делать заключения о том, чего мы не воспринимаем, хотя заключения эти мы и должны постоянно исправлять, ибо они входят в противоречия с новыми восприятиями». Если быть последовательным, то из подобных приведенных здесь рассуждений сторонников Маха и др. вытекает отрицание существования не только всех других существ, кроме собственного Я, но и всех представлений, которые имелись раньше. Так опровергает Больцман идеалистическую философию махизма, сводя ее к солипсизму. Как ни странно, но в свое время Больцману в связи с его борьбой против абсолютизации чисто феноменологических теорий пришлось отстаивать пользу и необходимость гипотез для развития науки.

В статье «О статистической механике» Больцман пишет: «Наши теории никоим образом не построены из логически неопровержимых истин; напротив,

они состоят из более или менее произвольных картин — так называемых гипотез».

Кирхгоф в труде по механике ставит себе задачей описать явления природы возможно просто и наглядно, отказываясь от какого-либо их объяснения. Его работой началась модная в то время «описательная физика». Ее сторонники возражали против объяснения явлений природы, поскольку мы не в состоянии до конца объяснить их. Наиболее простые закономерности природы не могут быть на данном этапе развития науки объектом объяснения. «Наука о природе только разлагает комплексы на более простые и однородные составные части, сводит более сложные законы к более фундаментальным» — говорит Больцман. На этом процесс объяснения, естественно, должен заканчиваться. Но эта естественная граница объяснения не есть проявление ограниченности нашего интеллекта, так же как не является дефектом нашего зрения то, что мы не можем видеть сквозь непрозрачные предметы. Сам Больцман пишет по этому поводу: «Некоторые проблемы напоминают вопрос, поставленный одному художнику: „Что за картину он спрятал за занавесом?“ — „Занавес и есть картина“, — ответил художник. Ему было предложено обмануть знатоков своим искусством, для чего он и нарисовал картину, изображающую занавес. Обыкновенно усматривают ограничение нашего интеллекта в том обстоятельстве, что если бы нам удалось открыть самые простые, основные законы, то мы не были бы в состоянии их дальше объяснить, т. е. разложить на более простые. Не стоим ли мы перед вышеупомянутым нарисованным занавесом?».

Больцман был последовательным атомистом и приложил много сил, чтобы отстоять право атомистической теории на существование: «... Все наблюдения единогласно доказывают, что существуют тела таких ничтожных размеров, что только сцепляясь миллионами они могут возбуждать наши органы чувств. Мы называем их атомами и молекулами ... О структуре атома мы не будем знать ничего до тех пор, пока на основании наблюдений нам не удастся сформулировать какую-нибудь гипотезу... Надежду на успех дает спектральный анализ. Существование атомов и молекул является, конечно, только гипотезой. Может быть, атомистическая гипотеза будет вытеснена какой-либо другой гипотезой. Может быть, но невероятно». Невероятно, по мнению Больцмана, потому, что на основе атомистической гипотезы были сделаны предсказания, которые он ставит в ряд с предсказанием планеты Нептуна Леверье. И далее: «Тесно к атомистике примыкает гипотеза о том, что элементы телесного мира не остаются в покое, образуя материю, но что они находятся в непрерывном движении. И эта гипотеза, которую называют механической теорией тепла, также представляет собою воззрение, твердо опирающееся на факты» (Статья «2-й закон механической теории типа»).

«Не логика, не философия, не метафизика решают в последней инстанции, верно что-либо или ложно, а дело. То что ведет нас к верному делу, то и истина. Поэтому я считаю завоевания техники не побочными продуктами естественных наук, а логическими доказательствами. Если бы мы не достигли этих практических результатов, мы не знали бы, как рассуждать».

Можно было бы привести еще немало высказываний Больцмана по вопросам методологии физики и даже чисто философским. Больцман часто выступал с популярными лекциями, докладами, которые были изданы отдельной книгой «Populäre Schriften», причем он не боялся портить отношения, чем завоевал себе славу человека неуживчивого, с беспokoйным характером. Этим, по-видимому, объясняются его частые переезды и смена профессур.

Борьба Больцмана против махизма, которую он вел с большой энергией, отмечена у В. И. Ленина. В книге «Материализм и эмпириокритицизм» читаем: «Из немецких физиков систематически боролся против махистского течения умерший в 1906 году Людвиг Больцман. Увлечению новыми гносеологическими

догмами он противопоставлял простое и ясное сведение махизма к солипсизму... Больцман, конечно, боится назвать себя материалистом и даже специально оговаривается, что он вовсе не против бытия божия. Но его теория познания по существу дела материалистическая и выражает она мнение большинства естествоиспытателей».

Перейдем к характеристике физических воззрений Больцмана и прежде всего его механицизма. Сам он об этом пишет: «Если вы спросите меня относительно моего убеждения, назовут ли нынешний век железным веком или веком пара и электричества, я отвечу не задумываясь, что наш век будет называться веком механического миропонимания, веком Дарвина». В этих словах скрыт глубокий смысл: Больцман не только механист в узком смысле слова. На языке естествоиспытателя того времени слово механицизм означало зачастую просто мировоззрение, базирующееся на признании причинности и закономерности в природе.

По Больцману механика служит фундаментом общего естествознания, ибо наипростейшее явление — это перемена места. «Мы выбираем для объяснения явлений природы совокупность очень большого числа очень малых частиц, непрерывно движущихся и подчиняющихся законам механики» («Принципы механики»). Таким образом, атомистика Больцмана — это механическая атомистика, отличающаяся от наших современных представлений. Осторожный естествоиспытатель Больцман чужд застою и консерватизма. Интересно, например, его отношение к утверждению о неделимости атомов. По этому поводу он писал: «В неделимости атома не верит в настоящее время ни один физик». Больцману пришлось отстаивать атомистику главным образом в спорах с энергетикой, причем его интересовала, в основном, проблема структуры материи. Он исходил из дискретности материи и от нее шел к континууму и дифференциальным уравнениям, неоднократно обсуждая этот предельный переход в статьях «О неизбежности атомистики в естественных науках», «Еще раз об атомистике» и других. На попытки энергетиков спрятаться за дифференциальные уравнения Больцман возражал, говоря, что тот, кто не видит атомистики за дифференциальными уравнениями, за деревьями не видит леса.

Больцман не отрицал возможности немеханического объяснения природы, он не возводил в абсолют механицизм, а просто считал, что в его время ничего лучше не было.

«Никто не утверждает, что существует доказательство того, что совокупность явлений природы может быть объяснена механически. Я сам когда-то ломал копыя за механическое воззрение на природу, но только в том смысле, что оно является колоссальным прогрессом по сравнению с прежним, чистомистическим». И дальше: «Это представление является для нас только опытом, который может быть усовершенствован, а со временем, быть может, даже вообще оставлен» («Математика об энергетике»). При этом Больцман считал, что всякое новое немеханическое миропонимание должно будет включить в себя элементы прежнего механического. Но он яростно отбивал попытки отвергнуть его теории только потому, что они механистические и отстаивают атомистику, хотя оппоненты не могли предложить что-либо лучшее. «Не от энергетики, не от феноменологии пришел луч надежды немеханического объяснения природы, но от атомистической теории. Нечего говорить, что я имею в виду современную электронную теорию» — так приветствовал Больцман появление последней.

Больцман был исследователем в высшей степени оригинальным и наряду с выдающимися теоретическими работами является автором ряда тонких экспериментальных исследований. Высокий уровень его математической культуры, богатая фантазия, интуиция и экспериментальные способности характеризуют его научное лицо. Больцман не идет напролом к решению сложных проблем. «В естествознании менее, чем где-либо, оправдывается положение, что прямой.

путь — самый короткий» — говорит он. Но и занимаясь проблемами, которые кажутся ему разрешимыми в данный момент, он не теряет из вида большие проблемы общего характера.

Больцман был не только выдающимся ученым, но и выдающимся преподавателем. Поражает его умение кристально ясно излагать сложнейшие вопросы теоретической физики. Впрочем, стремление к ясности, строгости и законченности вообще отличает его творчество.

Больцман был человеком очень широкого диапазона. Среди работ Больцмана имеются работы и по математике, и по механике, и по гидродинамике, и по теории упругости, и по теории электромагнитного поля и оптике, и по термодинамике и кинетической теории газов. Значение этих работ неодинаково. Из них, бесспорно, выделяются работы по кинетической теории газов, и статистическому обоснованию термодинамики.

Постараемся проследить появление важнейших работ Больцмана в этой области.

В 1871—1872 г. появляются три важнейших работы Больцмана: «О тепловом равновесии многоатомного газа», «Аналитическое доказательство 2-го закона механической теории тепла» и «Дальнейшее исследование теплового равновесия газовых молекул». В этих работах анализируется установление теплового равновесия в газах и распределение Максвелла обобщаются сначала на случай многоатомных молекул, а затем на случай смеси газов. При этом получается знаменитое больцмановское распределение, которое встречается всюду, где применяется классическая статистика.

В работе 1875 г. «О тепловом равновесии в газе, на который действуют внешние силы» показано, что полученные ранее результаты сохраняют свою силу для случая газа, находящегося в поле внешних сил. В этой работе Больцман формулирует общее газокинетическое уравнение именно в том виде, в котором оно используется и сейчас, хотя в более ранних его работах оно уже встречалось для различных частных случаев (стационарного, без наличия внешних сил и др.). Все доказательства он проводит исходя из своего уравнения. Вводя функцию H (средний логарифм функции распределения), он доказывает свою знаменитую H -теорему в самом общем виде (доказательство для частного случая в отсутствие внешних сил было им дано еще в 1872 г.). H -теорема гласит: функция H с течением времени не может возрасть, т. е. ее поведение с точностью до знака аналогично поведению энтропии. Функция H остается постоянной для случая термодинамического равновесия. В этой же работе показано, что только больцмановское распределение удовлетворяет условиям статистического равновесия.

Спустя 2 года, в 1877 г., в работе «О связи между 2-м законом механической теории тепла и теорией вероятностей» Больцман указывает связь H -функции со статистическим весом данного состояния и показывает таким образом, что наименее вероятное состояние и состояние теплового равновесия идентичны. Эти результаты затем обобщаются на случай многоатомных молекул и на случай наличия поля внешних сил. Вычисляя функцию H для случая идеального одноатомного газа, Больцман показал пропорциональность энтропии и функции H ; таким образом, энтропия была связана с вероятностью данного макроскопического состояния. Этими работами под термодинамику была подведена статистическая база, что является одним из величайших открытий физики, позволяющим связывать термодинамические свойства вещества с его молекулярным строением. Эта концепция является основой всей статистической физики.

В ряде последующих работ Больцман разрабатывает методы приближенного решения своего уравнения, выводит из него гидродинамические уравнения, исследует возможность распространения кинетической теории газов на случай сил притяжения и т. д. Он применяет свой метод к явлениям переноса

са в газах, рассматривает явления диффузии, внутреннего трения и другие. Этим, конечно, не ограничиваются его работы по термодинамике и теории газов.

Истолкование энтропии как величины, пропорциональной логарифму вероятности состояния, является блестящим достижением Больцмана. Это толкование сыграло основную роль и в наше время, послужив, например, основным понятием современной теории информации.

Сегодня, как никогда, понятен смысл великой формулы Больцмана $S = k \ln W$, которая, как сказал Зоммерфельд, «высеченная на памятнике Больцмана на Венском кладбище, парит на фоне облаков, плывущих над могилой великого Больцмана».

H -теорема Больцмана вызвала огромную и весьма плодотворную дискуссию, благодаря которой создался ряд новых научных направлений, например так называемая эргодическая теория.

Противники H -теоремы указывали, что монотонное изменение величины H противоречит полной обратимости механики (Лошмидт) и так называемой теореме о возвращаемости (Пуанкаре — Цермело), согласно которой состояние динамических систем должны через некоторое время приближенно повторяться.

Занявшись более внимательным анализом предпосылок H -теоремы, Больцман приходит к более ясной формулировке статистического характера второго начала термодинамики: возрастание является лишь наиболее вероятным изменением энтропии при определенных условиях, налагаемых на начальное состояние рассматриваемой молекулярной системы. Именно, рассматривая систему, которая в начальный момент t_0 была в маловероятном состоянии и которая с течением времени переходит к более вероятным состояниям, мы приходим к подавляюще вероятному возрастанию энтропии, хотя возможно и ее убывание. С другой стороны, из обратимости механики следует, что до момента t_0 энтропия должна была уменьшиться со столь же большой вероятностью. Таким образом, мы получили обратимую флуктуацию в момент t_0 .

Чтобы понять необратимость статистических процессов, нужно только предположить, что мы присутствуем при затухании космически грандиозной флуктуации. Изложенное выражает как раз краткий смысл флуктуационной гипотезы Больцмана, стремившегося примирить наблюдаемую термодинамическую необратимость с материалистическим представлением о неограниченном существовании вселенной. Эта гипотеза сыграла свою роль в борьбе против антинаучной теории «тепловой смерти» вселенной. Представление о тепловой смерти было основано на применении ко всей вселенной в целом термодинамических законов. Однако это — необоснованная экстраполяция. Такое возражение относится, конечно, также к флуктуационной гипотезе Больцмана.

Проблема создания статистической теории необратимых процессов, первое решение которой было дано Больцманом, оказалось весьма плодотворной. Этой проблеме посвятил всю свою жизнь его ученик, великий польский физик Мариан Смолуховский.

Исследования Смолуховского привели к созданию статистической теории брауновского движения, которая сыграла огромную роль в науке. Достаточно сказать, что на базе этих работ выросла сегодня обширная ветвь математики — теория марковских случайных процессов.

Исследование брауновского движения привело к открытию меры Винера, имеющей в настоящее время фундаментальное значение после работ Фейнмана и в такой совершенно новой области, как квантовая теория поля.

Вторая большая группа работ Больцмана посвящена максвелловской теории электромагнетизма. Больцман принадлежит к числу поклонников и пропагандистов теории Максвелла, шедшей тогда в разрез с привычными взглядами и казавшейся многим математически чрезвычайно сложной.

Первая большая экспериментальная работа Больцмана была посвящена доказательству справедливости максвелловского соотношения между показателем преломления и диэлектрической постоянной вещества.

Сначала Больцман исследовал твердые изоляторы. Методом конденсатора он определил диэлектрические постоянные серы, парафина. Значительно большие трудности представило определение диэлектрических постоянных газов. Им были исследованы воздух, водород, кислород, углекислый газ и др. Большие трудности, которые при этом были преодолены, свидетельствуют об экспериментальном искусстве Больцмана. Еще большие трудности Больцман преодолел при определении зависимости диэлектрической постоянной от направления в случае анизотропии среды. Он был первый, кто сделал этот вывод из максвелловской теории, и сам же проверил его в опытах с шаром, вырезанным из кристалла ромбической серы. Так Больцман один из первых дал экспериментальное доказательство теории Максвелла.

Вторая часть его работ по теории электромагнитного поля, относящихся к этим же годам (1872—1874 гг.), посвящена изучению поляризации диэлектриков в электрическом поле. В частности, целью одной из его работ являлось показать, что изменение емкости конденсатора объясняется именно поляризацией диэлектрика, а не его слабой проводимостью. Попутно, другим методом, им были определены диэлектрические постоянные ряда веществ.

Кроме того, можно указать на его некоторые теоретические работы, например, о движении электричества на изогнутых поверхностях, о взаимодействии частей электрического контура произвольной формы и т. д.

Нельзя не отметить его работ по теории термоэлектричества, диамагнетизма, эффекта Холла, где им была указана возможность определения знака носителей заряда, теории электро- и магнитострикции, исследований о действии магнитного поля на электрический разряд в разреженных газах, несколько работ о капиллярных явлениях и теплоемкости газов.

Реализуя идею Больцмана, Теплер построил прибор, позволяющий оптическим методом анализировать акустические колебания. Этим методом были исследованы периоды, амплитуды, сдвиги фаз и другие характеристики колебаний в воздушных резонаторах. Несколько работ Больцмана посвящено теории упругого последствия, причем он отстаивал ту точку зрения, что упругая сила зависит не только от мгновенной, но и от предшествующей деформации. Свою теорию Больцман пытался подтвердить опытами по крутильным колебаниям металлических стержней.

В 1884 г. Больцман теоретически вывел закон Стефана о тепловом излучении. Из общих соображений он получил известную формулу, связывающую давление и плотность энергии черного излучения, и затем, применяя термодинамику к тепловому излучению, получил свою знаменитую формулу.

Лоренц назвал эту работу «перлом физики». Перечисленные работы не исчерпывают всего списка трудов Больцмана, но дают представление о широте его научных интересов и размахе деятельности. Но, конечно, основные его результаты принадлежат кинетической теории газов и статистическому обоснованию термодинамики. Сам Больцман говорил: «Отдельный человек может достигнуть большого значения лишь благодаря полной преданности какой-либо идее». Этими словами и хочется закончить обзор его деятельности.