

Эволюция физики: от действия сил к силе действия

Томилин К.А.,
к. ф.-м. н., ИИЕТ РАН им. С.И. Вавилова,
ktomilin@mail.ru

Аннотация: В начальный период изучения физических явлений идея «силы» широко использовалась для объяснения нестационарности наблюдаемых явлений, таких как движение тел. Однако по мере развития механики и физических теорий силовые понятия получили собственные формальные определения и названия, без использования термина «сила». Так возникло понятие кинетической энергии вместо *vis viva* («живой силы») и «тока» вместо «силы тока» и т. д. Кроме того, был сформулирован ряд новых физических теорий без использования концепции силы. В результате различные типы сил постепенно были заменены другими, более важными понятиями, такими как энергия и действие, прямо связанными с фундаментальными физическими принципами. Общей тенденцией в развитии цивилизации является переход от неограниченной власти (выраженной в тезисе «сила определяет право») к ее подчинению и включению в правовые рамки. Это похоже на эволюцию физики, в ходе которой понятие силы было устранено или подчинено более общим принципам и законам.

Ключевые слова: сила, энергия, действие, право.

Для описания тех или иных явлений ученые (натурфилософы) широко использовали понятие «сила» — сила инерции, движущая сила, ускорительная сила, живая сила, мертвая сила и др., вкладывая в него разный смысл. В доньютоновский период сложились представления, что сила является источником движения и ее необходимо постоянно прикладывать для перемещения тел, чтобы преодолеть другую силу — силу инерции, имманентно присущую материи. На самом деле, с современной точки зрения речь шла о преодолении другой силы — силы сопротивления среды. Собственно развитие теоретической физики началось с переходом к идеальным моделям, в том числе без учета сил сопротивления, и связывается с именем Г. Галилея. В этом смысле его можно называть «отцом современной физики и, по сути, всего современного естествознания», как считал А. Эйнштейн [1, р. 164]. Такое же мнение высказывают и современные историки науки [2]. В методологии физики этот метод получил название метода приемлемой идеализации (см. [3]). В физических теориях получили распространение простые идеальные модели — материальной точки, точечного заряда, поля, абсолютно твердого тела, идеального газа, несжимаемой жидкости и др. Такие идеальные модели открыли возможность использования простого математического аппарата.

Галилею принадлежат и два важных открытия — то, что тела, приведенные в движение, будут двигаться бесконечно долго при отсутствии сопротивления среды (принцип инерции), и то, что явления не меняются при равномерном прямолинейном

движении (получивший в дальнейшем название принципа относительности Галилея). Принцип инерции Галилея был утвержден И. Ньютоном как первый закон механики (тела движутся равномерно и прямолинейно, если к ним не приложена сила), а изменение движения (*mutationem motus*) является следствием прикладывания к телу силы (*vis*) и происходит в направлении приложенной силы (второй закон механики). Таким образом, согласно Ньютону, сила становилась причиной не постоянного движения, а изменения движения, мерой которого является количество движения (импульс): $\Delta p \sim F$ (в современной физике это формула $dp/dt=F$). Поскольку импульс в ньютоновской механике определялся как $p=mv$, то этот закон уже последователями Ньютона — Я. Германом, Л. Эйлером и др. — был преобразован к форме $F=ma$, где a — ускорение тела, и в таком виде утвердился в педагогической литературе, несмотря на неоднозначную интерпретацию и ограниченную область применимости.

Одновременно с утверждением понятий и законов механики Ньютоном было провозглашено и существование силы всемирного тяготения, позволяющей объяснить как падение обычных тел, так и движение небесных тел — планет, их спутников и комет. Однако представление о существовании такой мгновенно действующей силы, присущей материи, вызвало неприятие со стороны крупных ученых того времени — Х. Гюйгенса, Г. Лейбница, а в дальнейшем Л. Эйлера и др. Даже сам Ньютон, как следует из его переписки с Бентли, скептически относился к своей идее. Не был принят этот закон и М.В. Ломоносовым, разрабатывавшим свою теорию. Первоначальное неприятие этого закона, в частности Эйлером, было связано не только с мгновенностью действия силы тяготения, но и с тем, что тела наделялись одновременно двумя внутренними, противоположными по своему действию «силами» — силой инерции, препятствующей изменению движения, и силой тяготения, вызывающей изменение движения. Парадоксальным также выглядело и равенство сил тяготения — например, что не только Земля притягивает яблоко, но и яблоко — Землю, причем с равной силой.

С середины XVIII в., после того как на основе закона всемирного тяготения Клеро была построена теория фигуры Земли и теория движения Луны, закон всемирного тяготения был признан в качестве важнейшего элемента физической картины мира. Более того, он стал образцом построения основного закона электростатики — закона Кулона взаимодействия электрических зарядов, и магнитостатики — закона Ампера взаимодействия электрических токов, а затем и разнообразных законов, учитывающих движение электрических зарядов на основе дальнего действия (мгновенно действующих сил), — теории В. Вебера и др. [4].

В 1860 г. в своей вступительной речи в лондонском Кингс-колледже Максвелл так выразил значение понятия силы в физике: «Мы должны оставить в стороне все вопросы, которыми мы интересуемся, как существа социальные, имеющие определенные моральные устои и обладающие привычкой получать удовольствие от того, что мы видим, не проявляя любопытства к тому, что за этим скрыто. Мы обращаем свой взор к области, в которой Сила есть единственный господин, а Материя является ее единственным подданным: в этой области существует только одна теория действия — сила создает право (*Might makes Right*)» [5]. Эта формула «сила дает право» уходит корнями еще в античность и воплощает кредо монархий и тоталитарных государств (в русском лексиконе ее аналогом является утверждение «кто сильнее, тот и прав»). Максвелл, как видим, увидел аналогичное строение классической физики.

Однако в том же 1860 г. Авраам Линкольн в своей исторической речи в Нью-Йорке перевернул эту формулу: «Давайте верить, что право дает силу (*right makes might*), и в этой вере давайте до конца осмелимся выполнить свой долг так, как мы его понимаем». Эта речь Линкольна перевела его из региональных политиков в национальные лидеры, позволила оказаться у руля страны в самый острый момент американской истории — конфронтации свободных и рабовладельческих штатов. Хотя попытка удержать страну в правовом поле не увенчалась успехом — конфронтация перешла в гражданскую войну, однако в результате в стране, в конце концов, установилось главенство права.

В 1931–1932 гг. эта же формула — соотношение между правом и силой — обсуждалась в открытой переписке двух выдающихся мыслителей — А. Эйнштейна и З. Фрейда, инициированной Институтом интеллектуального сотрудничества Лиги Наций — надгосударственной структурой, образовавшейся после первой мировой войны. Цель переписки была обозначена А. Эйнштейном в письме Фрейду: «Существует ли для человечества путь, позволяющий избежать опасности войны?» [6]. Однако ни эта попытка со стороны двух суперинтеллектуалов осмыслить истоки агрессии, актуальная до сих пор, ни структура Лиги Наций не смогли остановить конфронтацию государств, приведшую ко Второй мировой войне. Тем не менее, после войны цивилизация сделала следующий шаг к установлению международного права и прав человека — была образована Организация Объединенных Наций и в 1948 г. принята Всеобщая декларация прав человека. Таким образом, несмотря на временный социальный регресс и отбрасывание народов к «первобытной ступени организации» [7], продолжился тот общий тренд развития цивилизации, о котором писал Фрейд в письме Эйнштейну («дорога вела от силы к праву»), но на более высокой ступени развития права, утверждающей формулу Линкольна главенства права над силой.

Понятие «силы» вплоть до середины XIX в. необоснованно внедрялось для описания разнообразных явлений и процессов. Так, возникло понятие «сила инерции», которую характеризует просто количество материи (масса), однако при этом и в конце XX в. велись дискуссии, стоит ли рассматривать ее как реальную «силу». От названия кинетической и потенциальных энергий как «сил» удалось избавиться только во второй половине XIX в. Большую роль здесь сыграл У. Дж. Ренкин, который ввел термины активная и потенциальная энергия и в 1853 г. представил динамику через понятие энергии вместо силы. В 1820-е гг. в результате открытия Эрстедом влияния электрического тока на магнитную стрелку возникло понятие «сила тока» — мгновенно действующая сила, поворачивающая магнитную стрелку, которое затем было перенесено на сам поток электрических зарядов, т. е. не силовую величину. В дальнейшем в международной научной терминологии избавились от слова «сила» в отношении этой физической величины, однако термин «сила тока» до сих пор применяется в отечественных школьных и ряде вузовских учебников. При этом ряд работ зарубежных ученых (Ампер, Кирхгоф и др.) подвергался при переводе на русский язык необоснованной переделке терминологии с внедрением термина «сила» в понятие величины тока (потока) зарядов.

По мере эволюции физики понятие силы теряет свою общую значимость — с одной стороны, удается формализовать понятия, которые использовали термин «сила», и дать другие им названия, с другой стороны, ряд физических теорий формулировался уже без понятия силы. Так, теории теплопроводности было чуждо понятие силы, на что обратил

внимание еще Дж. К. Максвелл в докладе 1855 г. [8, р. 28]. К середине XIX в. наибольшее признание в научной среде получила электромагнитная теория Вебера, однако это направление (мгновенно действующих сил) в целом оказалось тупиковым. Прогресс в области электромагнетизма оказался связан с развитием концепции постепенного распространения электромагнитного взаимодействия (М. Фарадей, У. Томсон, Г. Тейт, Дж. К. Максвелл). Понятие силы предполагает существование двух объектов, взаимодействие между которыми зависит от специфических параметров обоих объектов (масс или зарядов). Восходящее к М. Фарадею понятие поля (field) оказалось более универсальным, чем понятие силы, поскольку характеризует влияние одного объекта в конкретной точке пространства и таким образом преодолевает специфичность другого тела, однако само поле выступает при этом как некая скрытая сущность, обнаруживаемая только при действии на пробную массу или пробный заряд. Именно эта «двуслойность» теории, по мнению Ф. Дайсона, является причиной сложности восприятия электродинамики Максвелла [9]. На основе понятия поля, характеризуемого в каждой точке пространства скалярным и векторным потенциалами (аналог понятия «электротонического состояния» М. Фарадея), Максвеллу удалось завершить объединение электростатики и магнитостатики в электродинамику и дать объяснение света как волнового распространения электрических и магнитных сил. После экспериментального подтверждения и признания максвелловской электродинамики произошло и кардинальное изменение общего взгляда на физическую картину мира — от механистической к электромагнитной картине мира, хотя ряд физиков домаквелловского поколения, например У. Томсон, так и остались на позициях механицизма.

Понятие силы постепенно отходило в тень других понятий, на первый план вышли понятия энергии и действия. Термин *action* использовал еще И. Ньютон в третьем законе механики, вкладывая в него некоторый силовой смысл (равенство сил действия и противодействия). Г. Лейбниц ввел понятия *vis viva* («живая сила» — в дальнейшем кинетическая энергия) и *action* (действие) как перенос количества движения (импульса) на некоторое расстояние, а Т. Юнг — термин «энергия». При этом формализация понятия действия происходила параллельно и в связи с открытием принципа наименьшего действия (Ферма, Лейбниц, Мопертюи, Эйлер, Лагранж), а понятия энергии — с утверждением принципа сохранения энергии (Лейбниц, Гельмгольц, Майер). Интересно, что Гельмгольц все еще использовал в середине XIX в. для обозначения энергии понятие «сила» (*Kraft*). Курьезом было то, что статью Гельмгольца отказались печатать в центральном немецком журнале того времени *Annalen der Physik*, и она в 1847 г. вышла отдельным изданием, обеспечив его приоритет в утверждении этого фундаментального физического принципа. На основе понятия энергии вместо сил была построена и механика в «Трактате о натуральной философии» У. Томсона и Г. Тейта. Выдвижение на первый план понятия энергии вместо неясного понятия силы вызвало восторженную реакцию Максвелла, выраженную им в стихотворной форме. Максвелл отметил, что слову «сила» придаются «значения самые странные и разнообразные, способные шокировать учеников Ньютона», подобно тому, как из «парихмахерской колодки» создаются разнообразные прически. «*Vis Viva, Vis Mortua* и *Vis Acceleratrix* — эти давно заученные слова, за которые до сих пор цепляются в наших учебниках, и которые как паразиты (*entozoa*) проникают в наши жизненно важные органы. Но посмотрите! Тейт пишет ясными символами, ясно одно маленькое уравнение; и Сила

(Force) становится из Энергии простой вариацией по Пространству. Сила есть Сила, но заметьте! ничего, только вектор; твои колючие стрелы уже потеряли свое жало, бессильная душа! Царство твое, о Сила! кончено. Теперь мы больше не обращаем внимания на твои действия» [10]. Хотя значение принципа сохранения механической энергии было осознано еще на рубеже XVII–XVIII вв., утверждение принципа сохранения энергии как фундаментального принципа задержалось вплоть до середины XIX в., когда тепловые потери были признаны одним из видов энергии. Таким образом, стало ясно, что во всех физических процессах энергия не создается и не исчезает, а просто переходит из одной формы в другую. История принципа сохранения энергии подробно изложена в монографиях М. Планка и И. Элканы [11, 12].

Значение другого важнейшего принципа — принципа наименьшего действия — заключается в анализе потенциальных путей эволюции системы (например, траекторий движения или распадов частиц). Как оказалось, законы природы соответствуют наиболее оптимальным путям. Таким образом, получить физические законы оказывается возможным варьированием действия по разным путям и поиском экстремума (обычно минимума). В обыденной практике вариационный принцип реализован, например, в анализе навигатором путей для движения автомашины из начальной точки в конечную с учетом пробок на дорогах. При этом оптимальный путь в данном случае соответствует минимальному времени времени пути. В результате понятия действия (action) и связанного с ним принципа наименьшего действия стали одними из центральных современных понятий и инструментов развития физического знания. При этом фундаментальное уравнение Эйлера-Лагранжа, связывающее функцию Лагранжа L и обобщенные координаты, можно рассматривать как обобщение второго закона Ньютона $d\mathbf{p}/dt=\mathbf{F}$, если ввести обобщенные импульсы и силы как частные производные от функции Лагранжа. История развития принципа наименьшего действия изложена в фундаментальной монографии Л.С. Полака, а в сборнике, изданном под его редакцией, опубликованы переводы основных оригинальных текстов [13, 14]. Хотя понятие силы сохранило свое значение в классической механике и электростатике, фактически вся современная физика концентрирована в функциях Лагранжа, вариации которых определяют физические законы.

Литература

1. Булюбаш Б.В. Электродинамика дальнего действия // Физика XIX–XX вв. в общенаучном и социокультурных контекстах. (Физика XIX века.) М.: Наука, 1995.
2. Вариационные принципы механики. Ред. Л.С. Полак. М.: Гос. изд. физ. мат. лит., 1959. 932 с.
3. Горелик Г.Е. Кто изобрел современную физику? От маятника Галилея до квантовой гравитации. М.: Соргус, 2013. 334 с.
4. Максвелл Дж.К. О Фарадеевых силовых линиях, в сб.: Джемс Клерк Максвелл. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. Пер. с англ. З.А. Цейтлина под ред. П.С. Кудрявцева. М., ГИТТЛ, 1952, с. 11–106.
5. Планк М. Принцип сохранения энергии. М.-Л.: ГОНТИ, 1938. 236 с.

6. Полак Л.С. Вариационные принципы механики. М.: Гос. изд. физ. мат. лит., 1960. 599 с.
7. Рытов С.М. О Леониде Исааковиче Манделъштаме // Успехи физических наук. 1979. 129, с. 279–288.
8. Фрейд З. Разочарование от войны // Электронный философский журнал Vox: <http://vox-journal.org> Выпуск 43 (декабрь 2023). С. 195. <https://vox-journal.org/html/issues/744/756.html>
9. Эйнштейн А. О методе теоретической физики // Собрание научных трудов в 4 томах. М.: Наука, 1967, с. 182.
10. Dyson F. Why is Maxwell's theory so hard to understand? // The Second European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007). doi: 10.1049/ic.2007.1146.
11. Elkana Y. The discovery of conservation energy. 1974. 192 p.
12. James Clerk Maxwell's Inaugural Lecture at King's College, London. // Am. J. Phys., November 1979, v. 47, pp. 928–932. doi: 10.1119/1.11613. Рус. пер.: Вступительная речь Дж. К. Максвелла в Королевском колледже // УФН, 1981, с.371. Перевод Н. Я. Смородинской.
13. Maxwell J.C. Report On Tait's Lecture On Force. <https://allpoetry.com/Report-On-Tait's-Lecture-On-Force>
14. Why War? An Exchange of Letters Between Freud and Einstein. https://www.sas.upenn.edu/~cavitch/pdf-library/Freud_and_Einstein_Why_War.pdf

References

1. Bulyubash B.V. Elektrodinamika dal'nodeystviya [Electrodynamics of long-range action] // *Fizika XIX–XX vv. v obshchenauchnom i sotsiokul'turnykh kontekstakh. (Fizika XIX veka.)* М.: Nauka, 1995. (In Russian.)
2. Dyson F. Why is Maxwell's theory so hard to understand? // The Second European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007). doi: 10.1049/ic.2007.1146.
3. Einstein A. On the method of theoretical physics // *Philosophy of Science*, 1934. 1 (2), p. 163–169.
4. Elkana Y. The discovery of conservation energy. 1974. 192 p.
5. Freyd Z. Razocharovaniye ot voyny [Disappointment from war] // *Elektronnyy filosofskiy zhurnal. Vox*: <http://vox-journal.org> Vyp. 43 (December 2023). S. 195. <https://vox-journal.org/html/issues/744/756.html> (In Russian.)
6. Gorelik G.Ye. *Kto izobrel sovremennuyu fiziku? Ot mayatnika Galileya do kvantovoy gravitatsii.* [Who invented modern physics? From Galileo's pendulum to quantum gravity] Moscow, Corpus, 2013, 334 s. (In Russian.)
7. James Clerk Maxwell's Inaugural Lecture at King's College, London // *Am. J. Phys.*, November 1979, v. 47, p. 928–932.
8. Maxwell J.C. On Faraday's Lines of Force // *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. X, Part I. P. 27–83 (1858).
9. Maxwell J.C. Report On Tait's Lecture On Force. <https://allpoetry.com/Report-On-Tait's-Lecture-On-Force>

10. *Planck M.* Das Prinzip der Erhaltung der Energie. 1887. Trans. in Russian s 4 izd. (1921): *Plank M.* Printsip sokhraneniya energii [The principle of energy conservation.]. M.-L.: GONTI, 1938. 236 s.
11. Polak L.S. Variatsionnyye printsipy mekhaniki [Variational principles of mechanics]. M.: Gos. izd. fiz.-mat. lit., 1960. 599 s. (In Russian.)
12. Rytov S.M. Leonid Isaakovich Mandel'shtam [Leonid Isaakovich Mandelstam] // *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1979, 22, s. 826–832. (In Russian.)
13. Variatsionnyye printsipy mekhaniki [Variational principles of mechanics]. Red. L.S. Polak. M.: Gos. izd. fiz.-mat. lit., 1959. 932 s. (In Russian.)
14. Why War? An Exchange of Letters Between Freud and Einstein. URL: <https://www.transcend.org/tms/wp-content/uploads/2017/06/Why-War-Freud.pdf>, accessed 11.03.2024.

The evolution of physics: from the action of forces to the power of action

Tomilin K.A.,
PhD in Physics,
S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology,
ktomilin@mail.ru

Abstract: At the beginning of the study of physical phenomena, the idea of "force" was widely used to explain the non-stationarity of observed phenomena, such as the movement of bodies. However, as mechanics and physical theories developed, the force notions gained own formal definitions and names, without the use of the term "force". So, the concept of kinetic energy arose instead of "vis viva", and "current" instead of "current strength" etc. Additionally, a number of new physical theories have been formulated without the use of force concept. As a result, different types of forces have gradually been replaced by other more important concepts, such as energy and action, which are closely linked to fundamental physical principles. It is interesting to note that the general trend in the development of civilizations has been a shift from unrestricted power (expressed in the thesis "might makes right") to its subordination and incorporation into a legal framework. This is similar to the evolution of physics, which has seen the notion of force become eliminated or subordinated to more general principles and laws.

Keywords: force, energy, action, law.