

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ИСТОРИИ, ФИЛОЛОГИИ И ФИЛОСОФИИ

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ПРОГРАММЫ В СОВРЕМЕННОЙ НАУКЕ

Ответственный редактор
д-р филос. наук А. Н. Кочергин

Отдельный оттиск



НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1987

- ¹² Гелл-Манн М., Розенбаум П. Е. Элементарные частицы // Элементарные частицы. М., 1963. С. 30—31. (Над чем думают физики. Вып. 2).
- ¹³ Огава С., Савада С., Накагава М. Составные модели элементарных частиц. М., 1983. С. 7.
- ¹⁴ Ахундов М. Д., Илларионов С. В. Методологический анализ современного этапа развития квантовой теории поля // Методы научного познания и физика. М., 1985. С. 297.
- ¹⁵ Куп Т. Структура научных революций. М., 1975. С. 119.
- ¹⁶ Гейзенберг В. Природа элементарных частиц // Успехи физ. наук. 1977. Т. 121, вып. 4. С. 657, 658.
- ¹⁷ Гейзенберг В. Природа элементарных частиц. С. 666.
- ¹⁸ Heisenberg W. Development of concepts in the history of quantum theory // Amer. j. of Physics. 1975. Vol. 43, N 5. P. 393.
- ¹⁹ Heisenberg W. Der Teil und das Ganze. München, 1969. S. 164.
- ²⁰ Чу Дж., Гелл-Манн М., Розенфельд А. Сильно взаимодействующие частицы. С. 111.
- ²¹ См.: Chew G. F. «Bootstrap»: a scientific idea? // Science, 1968. V. 161, N 3843. P. 762—765.
- ²² См.: Марков М. А. О природе материи. М., 1976.
- ²³ Salam A. Fundamental theory of matter // Contemporary physics: Trieste Symposium 1968. V. 2. Vienna, 1969. P. 33.
- ²⁴ Chew G. F. Hadron bootstrap: triumph or frustration? // Physics today. 1970. V. 23, N 10. P. 25.
- ²⁵ Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. I. М., 1965. С. 23.
- ²⁶ Окунь Л. Б. Современное состояние физики высоких энергий // Успехи физ. наук. 1981. Т. 134, вып. I. С. 4.
- ²⁷ Памбу Е. Кварки. М., 1984. С. 98.
- ²⁸ Philosophical and methodological problem in Physics. Kyoto, 1971. P. 1.
- ²⁹ Фейерабенд П. Избранные труды по методологии науки. М., 1986. С. 117.
- ³⁰ Гинзбург В. Л. О перспективах развития физики... С. 298.
- ³¹ Генденштейн Л. Э., Криве И. В. Суперсимметрия в квантовой механике // Успехи физ. наук. 1985. Т. 146, вып. 4. С. 555.
- ³² Визгин Вл. П. Единые теории поля в первой трети XX века. М., 1985. С. 278.
- ³³ Гайденко П. П. Эволюция понятия науки. М., 1980.

Ю. И. КУЛАКОВ, Л. С. СЫЧЕВА

ТЕОРИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СТРУКТУР КАК ПРОГРАММА ОБОСНОВАНИЯ ФИЗИКИ И КАК ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПРОГРАММА В МАТЕМАТИКЕ

Как известно, Н. Бурбаки предложили программу построения математики как целостной системы знания. Ими было показано, что в основании математики лежат три неза-

висимые порождающие структуры — алгебраическая, топологическая и структура порядка.

Аналогичная задача «бурбакизации» может быть поставлена и в физике (задача построения физики как целостного знания). Смысл ее состоит в том, чтобы свести все многообразие фундаментальных физических законов, понятий и величин к одной универсальной физической структуре, имеющей смысл особой скрытой симметрии мира физических объектов.

Физика представляет собой сложную иерархическую систему фундаментальных физических законов и понятий, основных уравнений и общеп физических принципов, наблюдаемых и ненаблюдаемых физических величин, равновесных и неравновесных процессов. В самом основании ее лежат фундаментальные физические законы, порождающие достаточно богатый набор исходных физических величин и понятий, таких как, например, пространство и время, масса и сила, температура, энтропия, электрический заряд, сопротивление и т. д. и т. п. Используя эти понятия и физические величины как исходный строительный материал, оказалось возможным сделать следующий шаг — сформулировать исходные динамические уравнения. Эти уравнения играют в физике настолько важную роль, что возникает соблазн сказать, что вся механика заключена в уравнении Ньютона, электродинамика — в уравнениях Максвелла, теория тяготения — в уравнении Эйнштейна, нерелятивистская квантовая механика — в уравнении Шредингера, релятивистская квантовая механика — в уравнении Дирака и т. д. Однако, сводя содержание различных разделов физики к соответствующим уравнениям, мы, сами того не замечая, рискуем лишить физику ее подлинного содержания, ибо главное содержание физики, как теперь выясняется, нужно искать не на уровне уравнений, а на более глубоком уровне фундаментальных физических законов, понятий и специфических физических величин, порождаемых особым видом симметрии физических объектов.

Заметим, что динамические уравнения получают неожиданную свежесть, появляясь заново совсем с другой стороны. Дело в том, что современная теория элементарных частиц, основанная на квантовой механике, во главу угла поставила ту часть квантовой теории, которая раньше занимала лишь подчиненное место. Речь идет о теории групп. В обычной квантовой теории группы симметрии играли лишь вспомогательную роль: в основе теории лежало «динамическое уравнение» (уравнение Шредингера или уравнение Дирака), которое в определенных условиях оказывалось

инвариантным относительно некоторой группы преобразований. Считалось, что уравнения в принципе могли бы быть решены и без групп, а группы рассматривались лишь как математический метод, позволяющий извлекать частичную информацию о квантовой системе без интегрирования уравнений.

Развитие теории элементарных частиц в последние годы обратило, в известном смысле, соотношение между уравнениями движения и группами симметрии. Теперь симметрия выступает на первый план, так как оказалось, что представления соответствующих групп несут самую фундаментальную информацию о системе. Таким образом, симметрия оказывается первичным, наиболее глубоким инструментом для физического описания природы¹.

Что же представляет собой физика в целом? По отношению к физике можно задать тот же вопрос, который задают Н. Бурбаки по отношению к математике: «Является ли это обширное разрастание развитием крепко сложенного организма, который с каждым днем приобретает все больше и больше согласованности и единства между своими вновь возникающими частями, или, напротив, оно является только внешним признаком тенденции к идущему все дальше и дальше распаду, обусловленному самой природой математики... Одним словом, существует в настоящее время одна математика или несколько математик?»²

Поиск ответа на этот вопрос, составляющий предмет уже не физики, а специфической области знания, которую по аналогии с математикой можно было бы назвать «метафизикой» или более традиционно — «основаниями физики», привел одного из авторов этой статьи к созданию теории физических структур³.

Эта теория исходит из хорошо известных физических законов и основных уравнений и выделяет из него нечто общее, универсальное, присущее всем фундаментальным физическим законам независимо от конкретной «физической природы» изучаемых объектов и используемых при этом измерительных приборов. Оказывается, что с каждым фундаментальным физическим законом тесно связан определенный тип устойчивых отношений (физическая структура определенного ранга), не зависящий ни от «физической природы» объекта, ни от выбора конкретного измерительного прибора. Строгая математическая формулировка понятия физической структуры делает возможным изучение общих свойств физических законов до их конкретной физической интерпретации, подобно тому как абстрактные методы элементарной алгебры позволяют решать конкретные школьные задачи.

Цель данной статьи — анализ того, как теория физических структур позволяет обнаружить глубокое единство самых различных разделов физики. Опираясь на методы, разработанные в рамках теории физических структур, можно показать, что такие внешне не похожие друг на друга разделы физики, как механика, специальная теория относительности, феноменологическая электродинамика, равновесная термодинамика как бы вырастают из единого корня, реализуя тем самым физические структуры различных рангов.

ЗАКОН НЬЮТОНА — ЗАКОН ИЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЕ?

Начнем с анализа понятия «физический закон». Поводом для такого анализа послужила та неопределенность, которая до сих пор остается при трактовке второго закона механики Ньютона $ma = \mathcal{F}$, закона Ома $\mathcal{I} = U/R$, известного соотношения электростатики $\mathcal{F} = qE$ и целого ряда других подобных соотношений: является ли каждое из выписанных соотношений «физическим законом» или определением соответственно силы $\mathcal{F}$, силы тока $\mathcal{I}$, напряженности электрического поля E ?

Заметим, что никаких проблем не возникает, когда речь идет о зависимости, например, давления реального газа p от его объема V при постоянной температуре. Здесь совершенно ясно, что имеет место простейший «физический закон» — связь между двумя независимо определенными, измеряемыми на опыте физическими величинами p_i и V_i , относящимися к различным состояниям i физического объекта (в данном случае реального газа) $p_i = f(V_i)$.

Когда же речь заходит о законе Ньютона $\mathcal{F} = ma$ или о соотношении $\mathcal{F} = qE$, ситуация сильно осложняется тем, что, строго говоря, хорошо определенной и измеряемой на опыте величиной является лишь ускорение a в первом случае и сила $\mathcal{F}$, действующая на заряд в электрическом поле, — во втором. Что же касается силы $\mathcal{F}$ и массы m в первом случае и электрического заряда q и напряженности электрического поля E — во втором, то вопрос об их независимом определении представляется не таким простым, как это может показаться на первый взгляд.

Вот что писал по поводу изложения механики Генрих Герц: «Кажется почти невозможной сама мысль искать логические несовершенства в системе, которая разрабатывалась лучшими умами. Но прежде чем отказаться от даль-

пейшего исследования, следует спросить, все ли, в том числе и лучшие умы, были удовлетворены этой системой... По моему мнению, прежде всего надо указать на то, что как раз введение в механику очень трудно излагать вдумчивым слушателям, не ощущая при этом необходимости то тут, то там приносить этим слушателям, конечно, не без некоторого смущения, извинения, и не испытывая желания побыстрее перейти от введения к примерам, которые говорят сами за себя»⁴.

Стараясь объяснить, почему Герц не был удовлетворен изложением механики в рамках классической системы, А. Пуанкаре писал: «Прежде всего мы оказываемся перед трудностями, когда хотим дать определение основным понятиям. Что такое масса? „Это,— отвечает Ньютон,— произведение объема на плотность“.— „Лучше было бы сказать,— отвечают Томсон и Тэт,— что плотность есть количество массы в единице объема“.— Что такое сила? „Это,— отвечает Лагранж,— причина, которая производит движение тела или которая стремится произвести движение“.— „Это,— скажет Кирхгоф,— произведение массы на ускорение“.— Но тогда почему не сказать, что масса есть количество силы, рассчитанной на единицу ускорения? Эти затруднения непреодолимы.

Когда говорят, что сила есть причина движения — это метафизика, и это определение, если бы пришлось довольствоваться им, оказалось бы совершенно бесплодным. Чтобы определение могло быть полезным, оно должно научить измерять силу; впрочем, этого достаточно, нет никакой необходимости, чтобы оно объясняло, что такое сила в себе, и что она является причиной или следствием движения. Итак, мы возвращаемся к определению Кирхгофа: сила равна массе, умноженной на ускорение. На этот „закон Ньютона“ перестают, в свою очередь, смотреть как на экспериментальный закон, он становится только определением. Но это определение также недостаточно, потому что мы не знаем, что такое масса... Не остается ничего, и наши усилия были бесплодными,— мы оказались перед необходимостью прибегнуть к следующему определению, которое, по существу, является признанием нашего бессилия: массы представляют собой коэффициенты, которые удобно вводить в вычисления... Мы должны сделать вывод, что при помощи классической системы невозможно дать удовлетворительную идею о силе и массе»⁵.

Итак, трудности, возникающие при попытке строгого определения понятий массы, силы, инерциальной системы

отсчета, не являются случайными. Как показали работы Герца, Кирхгофа, Гельмгольца, Пуанкаре, эти трудности носят принципиальный характер. Для их преодоления необходимо выйти за рамки существующей классической системы. Но чтобы это сделать, необходимо создать новую концептуальную систему, в основании которой лежали бы новые конструктивные понятия и принципы. Проиллюстрируем основные понятия и принципы этой новой концептуальной системы на примере второго закона механики Ньютона.

ЧТО ТАКОЕ ЗАКОН НЬЮТОНА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕОРИИ ФИЗИЧЕСКИХ СТРУКТУР

В чем состоит основное содержание механики? Чтобы понять это, начнем с самого начала. Рассмотрим два множества: $\mathfrak{M} = \{i, k, \dots\}$ — множество тел и $\mathfrak{N} = \{\alpha, \beta, \dots\}$ — множество акселераторов (ускорителей). (Под акселераторами мы будем понимать всевозможные механизмы и поля, сообщающие телам различные ускорения.) Акселератор α , действуя на тело i , сообщает ему ускорение $a_{i\alpha}$. Если рассмотреть воздействие всех акселераторов $\mathfrak{N}$ на все тела $\mathfrak{M}$, то совокупность всех полученных при этом ускорений можно представить в виде следующей прямоугольной матрицы

$$\begin{array}{cccc} a_{i\alpha} & a_{i\beta} & \dots & a_{i\gamma} \\ a_{k\alpha} & a_{k\beta} & \dots & a_{k\gamma} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n\alpha} & a_{n\beta} & \dots & a_{n\gamma} \end{array} \quad (1)$$

Заметим, что в этой матрице заложена вся информация об отношениях между телами и акселераторами. Задача состоит в том, чтобы извлечь ее из этой матрицы и воплотить в «физический закон». Оказывается, что матрица (1), составленная из экспериментальных значений соответствующих ускорений, измеренных в инерциальной системе отсчета, обнаруживает следующую любопытную закономерность: несмотря на произвольную природу тел $i, k, \dots$ и произвольную природу акселераторов $\alpha, \beta, \dots$, ускорения $a_{i\alpha}$ не являются произвольными; при произвольном выборе тел i и k и акселераторов α и β ускорения $a_{i\alpha}, a_{i\beta}, a_{k\alpha}, a_{k\beta}$ оказываются связанными между собой следующим соотношением:

$$\forall i, k \in \mathfrak{M}; \forall \alpha, \beta \in \mathfrak{N} \quad \begin{vmatrix} a_{i\alpha} & a_{i\beta} \\ a_{k\alpha} & a_{k\beta} \end{vmatrix} = 0. \quad (2)$$

Итак, соотношение (2), содержащее только измеряемые в опыте ускорения $a_{i\alpha}$ и справедливое при любом выборе двух тел i и k и двух акселераторов α и β , можно трактовать как фундаментальный опытный факт. Чуть ниже мы покажем, что из соотношения (2) вытекает, как следствие, второй закон механики Ньютона $\mathcal{F} = ma$ в его традиционной формулировке.

С формальной стороны соотношение (2) представляет собой некоторую функциональную связь

$$\Phi(a_{i\alpha}, a_{i\beta}, a_{k\alpha}, a_{k\beta}) = 0 \quad (3)$$

между четырьмя переменными $a_{i\alpha}$, $a_{i\beta}$, $a_{k\alpha}$, $a_{k\beta}$, каждая из которых является числовой функцией двух нечисловых переменных (например, ускорение $a_{i\alpha}$ есть функция тела i и акселератора α), а все соотношение в целом содержит четыре нечисловых переменных i , k , α , β .

Если рассматривать равенство (3) как функциональное уравнение относительно двух неизвестных функций $\Phi(u_1, u_2, u_3, u_4)$ и $a_{i\alpha}$ и потребовать, чтобы эта связь (3) сохраняла свой вид при любом выборе нечисловых переменных i , k , α , β (требование феноменологической симметрии), то можно показать⁶, что соотношение (2) является единственным соотношением, удовлетворяющим этому требованию (с точностью до произвольной функции $a'_{i\alpha} = \chi(a_{i\alpha})$, зависящей от выбора градуировки шкалы акселерометра и несущественной с точки зрения единственности физического закона).

Другими словами, одно только требование инвариантности соотношения (3) относительно выбора подмножеств $\mathfrak{M}_2 = \{i, k\} \subset \mathfrak{M}$, $\mathfrak{N}_2 = \{\alpha, \beta\} \subset \mathfrak{N}$ однозначно приводит к фундаментальному соотношению (2), которое мы называем *феноменологически инвариантной формой* второго закона механики Ньютона.

Итак, примем соотношение (2) в качестве фундаментального экспериментально проверяемого факта и получим из него, как следствие, второй закон механики Ньютона в его традиционной форме $\mathcal{F} = ma$.

Принимая соотношение (2) как исходный опытный факт, замечаем, что отношение двух ускорений $a_{i\alpha}$ и $a_{i\beta}$ одного и того же тела i под воздействием двух акселераторов α и β не зависит от выбора этого тела, т. е.

$$\frac{a_{i\alpha}}{a_{i\beta}} = \frac{a_{k\alpha}}{a_{k\beta}} = \frac{a_{n\alpha}}{a_{n\beta}} = \dots = \varphi_{\alpha\beta},$$

где $\varphi_{\alpha\beta}$ — некоторая величина, являющаяся относительной характеристикой акселераторов α , β , инвариантная относительно выбора тел.

Точно так же из равенства (2) следует, что отношение ускорений $a_{i\alpha}$ и $a_{k\alpha}$ двух различных тел i и k под воздействием одного и того же ускорителя α не зависит от выбора этого ускорителя, т. е.

$$\frac{a_{i\alpha}}{a_{k\alpha}} = \frac{a_{i\beta}}{a_{k\beta}} = \frac{a_{i\gamma}}{a_{k\gamma}} = \dots = \psi_{ik},$$

где ψ_{ik} — новая величина, являющаяся относительной характеристикой тел i и k , инвариантная относительно выбора акселераторов.

Итак, мы показали, что из фундаментального соотношения (2) следует вывод о существовании двух феноменологических инвариантов $\varphi_{\alpha\beta}$ и ψ_{ik} , характеризующих соответственно акселераторы и тела. Назовем одно из тел (например, тело k) и один из акселераторов (например, акселератор β) «эталоновыми» и переобозначим их соответственно через 1 и $\bar{1}$. Тогда будем иметь

$$a_{i\alpha} = a_{1\bar{1}} \psi_{i1} \varphi_{\alpha\bar{1}}. \quad (4)$$

Так как способ нахождения инвариантов известен ($\forall n \in \mathfrak{M}, \varphi_{\alpha\bar{1}} = a_{n\alpha}/a_{n\bar{1}}; \forall \gamma \in \mathfrak{N}, \psi_{i1} = a_{i\gamma}/a_{1\gamma}$), то равенство (4), представляющее собой мультипликативную форму записи закона Ньютона, допускает опытную проверку и имеет смысл физического закона, эквивалентного (2).

Но при этом возникает новый вопрос: а как сказывается на значении инвариантов $\varphi_{\alpha\bar{1}}$ и ψ_{i1} процедура суперпозиции соответственно акселераторов и тел? Это новая физическая проблема, и решить ее может только опыт. Однако и здесь мы сталкиваемся с проявлением феноменологической инвариантности, хотя и в несколько иной (аддитивной) форме.

Обозначим через $a_{i,\alpha+\beta}$ ускорение тела i при одновременном действии на него акселераторов α и β и аналогично через $a_{i+k,\alpha}$ ускорение тела $i+k$, полученного в результате механического объединения тел i и k , под действием акселератора α .

Как показывает опыт, имеют место следующие два феноменологически инвариантные соотношения:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha, \beta, \gamma, \delta \in \mathfrak{N} \quad \Phi_1(a_{i,\alpha+\gamma}, a_{i,\alpha+\delta}, a_{i,\beta+\gamma}, a_{i,\beta+\delta}) = \\ = a_{i,\alpha+\gamma} + a_{i,\beta+\delta} - a_{i,\alpha+\delta} - a_{i,\beta+\gamma} = 0; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\forall i, k, n, l \in \mathfrak{M} \quad \Phi_2(a_{i+n, \alpha}, a_{i+l, \alpha}, a_{k+n, \alpha}, a_{k+l, \alpha}) = \\ = \frac{1}{a_{i+n, \alpha}} + \frac{1}{a_{k+l, \alpha}} - \frac{1}{a_{i+l, \alpha}} - \frac{1}{a_{k+n, \alpha}} = 0. \quad (6)$$

Разделив (5) на $a_{i\bar{1}}$ и умножив (6) на $a_{1\alpha}$, получим закон аддитивности $\varphi_{\alpha\bar{1}}$:

$$\varphi_{\alpha+\gamma, \bar{1}} + \varphi_{\beta+\delta, \bar{1}} - \varphi_{\alpha+\delta, \bar{1}} - \varphi_{\beta+\gamma, \bar{1}} = 0$$

и закон аддитивности $\frac{1}{\psi_{i1}}$:

$$\frac{1}{\psi_{i+n, 1}} + \frac{1}{\psi_{k+l, 1}} - \frac{1}{\psi_{i+l, 1}} - \frac{1}{\psi_{k+n, 1}} = 0.$$

Таким образом, удобно в качестве характеристики акселератора α взять феноменологический инвариант $\varphi_{\alpha\bar{1}}$, обладающий свойством аддитивности, и назвать его «силой» $\mathcal{F}_{\alpha\bar{1}}$, а в качестве характеристики тела i взять обладающую свойством аддитивности величину, обратную феноменологическому инварианту ψ_{i1} , и назвать ее «массой» m_{i1} . Заметим, что в принципе мы могли бы назвать «силой» и «массой» любую монотонную функцию соответственно $\varphi_{\alpha\bar{1}}$ и ψ_{i1} ; правда, введенные таким образом «сила» и «масса» подчинялись бы неаддитивному закону композиции.

Итак, силой $\mathcal{F}_{\alpha\bar{1}}$ называется относительный аддитивный феноменологический инвариант $\varphi_{\alpha\bar{1}}$, зависящий от выбора эталонного акселератора $\bar{1}$ и не зависящий от выбора тела n :

$$\mathcal{F}_{\alpha\bar{1}} = \varphi_{\alpha\bar{1}} = \frac{a_{n\alpha}}{a_{n\bar{1}}}.$$

При этом имеет место обобщенный закон аддитивности сил:

$$\mathcal{F}_{\alpha+\gamma, \bar{1}} + \mathcal{F}_{\beta+\delta, \bar{1}} - \mathcal{F}_{\alpha+\delta, \bar{1}} - \mathcal{F}_{\beta+\gamma, \bar{1}} = 0.$$

Точно так же массой m_{i1} называется относительный аддитивный феноменологический инвариант $1/\psi_{i1}$, зависящий от выбора эталонного тела 1 и не зависящий от выбора акселератора:

$$m_{i1} = \frac{1}{\psi_{i1}} = \frac{a_{1\gamma}}{a_{i\gamma}}.$$

При этом имеет место обобщенный закон аддитивности масс:

$$m_{i+n, 1} + m_{k+l, 1} - m_{i+l, 1} - m_{k+n, 1} = 0.$$

Фиксируя эталонное тело 1, мы тем самым устанавливаем «размерность» массы. Точно так же можно произвольно зафиксировать эталонный акселератор $\bar{1}$ и установить тем самым «размерность» силы. Но часто из соображений удобства эталонный акселератор $\bar{1}$ выбирают в зависимости от эталонного тела 1, например так, чтобы ускорение $a_{1\bar{1}}$ равнялось бы единице. Если вернуться к фундаментальному соотношению (2), то переписывая его в новых обозначениях, получаем второй закон механики Ньютона в его традиционной канонической форме:

$$m_{i1}a_{i\alpha} = a_{1\bar{1}}\mathcal{F}_{\alpha\bar{1}}$$

или при специальном выборе эталонного акселератора $\bar{1}$ в виде $m_i a_{i\alpha} = \mathcal{F}_\alpha$.

Итак, мы показали, что второй закон механики Ньютона является следствием фундаментального соотношения между ускорениями (2) и содержит два, вообще говоря, произвольных определения — определения массы и силы. Принятые определения m и $\mathcal{F}$ удобны, так как в наиболее простой аддитивной форме отражают факт существования еще двух соотношений между ускорениями, связанных с законами композиции акселераторов и тел.

Необходимо отметить, что фундаментальное соотношение (2), выражая наиболее глубокие динамические свойства отношения между множеством тел и множеством акселераторов, остается справедливым как в рамках классической механики Ньютона, так и в рамках специальной и даже общей теории относительности. Все отличие состоит лишь в выборе той или иной геометрии и соответствующей ей кинематики. Так, если понимать под $a_{i\alpha}$ обычное ускорение $\frac{dv^\lambda}{dt}$ ($\lambda = 1, 2, 3$), то получаем закон Ньютона в его нерелятивистской формулировке:

$$m_i \left(\frac{dv^\lambda}{dt} \right)_{i\alpha} = \mathcal{F}_\alpha^\lambda.$$

Если же в качестве $a_{i\alpha}$ принять четырехмерное ускорение $\frac{du^n}{d\tau}$ ($n = 0, 1, 2, 3$), ковариантное относительно преобразований Лоренца, то получим выражение для закона Ньютона в специальной теории относительности:

$$m_i \left(\frac{du^n}{d\tau} \right)_{i\alpha} = \mathcal{F}_\alpha^n.$$

Наконец, если под $a_{i\alpha}$ понимать абсолютное общековариантное четырехмерное ускорение, то получим закон Ньютона в общей теории относительности:

$$m_i \left(\frac{du^n}{d\tau} + \Gamma_{pq}^n u^p u^q \right)_{i\alpha} = \mathcal{F}_\alpha^n.$$

Итак, мы видим, что во всех случаях осуществлено полное отделение динамических понятий — массы m_i и силы $\mathcal{F}_\alpha$, от чисто кинематического понятия — ускорения $a_{i\alpha}$, так что во всех случаях мы имеем второй закон механики Ньютона в одной и той же канонической формулировке: произведение постоянной массы материальной точки m_i на ее абсолютное ускорение $a_{i\alpha}$ равно действующей силе $\mathcal{F}_\alpha$.

ТЕОРИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СТРУКТУР И ЗАДАЧА ПЕРЕИЗЛОЖЕНИЯ ФИЗИКИ

Проведенное выше переизложение основных понятий и законов механики подобным же образом можно осуществить и в других разделах физики, в основании которых лежат те или иные фундаментальные физические законы. Оказывается, каждый фундаментальный физический закон допускает две эквивалентные формы записи — хорошо известную каноническую и мало кому известную феноменологически инвариантную.

Фундаментальный физический закон в феноменологически инвариантной форме представляет собой универсальное соотношение между измеряемыми на опыте двухиндексными величинами $a_{i\alpha}$, относящимися к конечному числу r физических объектов из одного множества $\mathfrak{M}$ и к конечному числу s физических объектов из другого множества $\mathfrak{N}$. Пара целых натуральных чисел (r, s) , определяющая конкретный вид фундаментального физического закона, называется рангом физической структуры на множестве $\mathfrak{M} \times \mathfrak{N}$. Приведем несколько примеров.

1. Закон механики Ньютона.

Каноническая форма:

$$m_i a_{i\alpha} = \mathcal{F}_\alpha.$$

Феноменологически инвариантная форма:

$$\begin{aligned} \text{ранг } (r, s) &= (2, 2) \\ \wedge i, k \in \mathfrak{M} \vee \alpha, \beta \in \mathfrak{N} \end{aligned}$$

$$\mathcal{D}_{ik, \alpha\beta}(a_{i\alpha}, a_{i\beta}, a_{k\alpha}, a_{k\beta}) = \begin{vmatrix} a_{i\alpha} & a_{i\beta} \\ a_{k\alpha} & a_{k\beta} \end{vmatrix} = 0.$$

2. Закон Ома для всей цепи.

Каноническая форма:

$$\mathcal{I}_{i\alpha} = \frac{\mathcal{E}_\alpha}{R_i + \rho_\alpha}.$$

Феноменологически инвариантная форма:

$$\text{ранг } (r, s) = (3, 2)$$

$$\forall i, k, m \in \mathfrak{M} \quad \forall \alpha, \beta \in \mathfrak{N}$$

$$\mathcal{D}_{ikm-, \alpha\beta} (I_{i\alpha}, I_{i\beta}, I_{k\alpha}, I_{k\beta}, I_{m\alpha}, I_{m\beta}) = \begin{vmatrix} 1 & I_{i\alpha} & I_{i\beta} \\ 1 & I_{k\alpha} & I_{k\beta} \\ 1 & I_{m\alpha} & I_{m\beta} \end{vmatrix} = 0,$$

где $I_{i\alpha} = \frac{1}{\mathcal{I}_{i\alpha}}$, $\mathcal{I}_{i\alpha}$ — сила электрического тока, проходящего через проводник i при подключении к нему источника тока α .

3. Фундаментальный закон трехмерной евклидовой геометрии.

Каноническая форма:

$$l_{in}^2 = (x_i - x_n)^2 + (y_i - y_n)^2 + (z_i - z_n)^2.$$

Феноменологически инвариантная форма:

$$\text{ранг } (r, s) = (5, 5)$$

$$\forall i, k, m, n, p \in \mathfrak{M}; \quad \forall u, v, w, t, q \in \mathfrak{N}$$

$$l_{ikmnp, uvwtq}^2 (l_{iu}^2, l_{iv}^2, \dots, l_{pq}^2) = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & l_{iu}^2 & l_{iv}^2 & l_{iw}^2 & l_{it}^2 & l_{iq}^2 \\ 1 & l_{ku}^2 & l_{kv}^2 & l_{kw}^2 & l_{kt}^2 & l_{kq}^2 \\ 1 & l_{mu}^2 & l_{mv}^2 & l_{mw}^2 & l_{mt}^2 & l_{mq}^2 \\ 1 & l_{nu}^2 & l_{nv}^2 & l_{nw}^2 & l_{nt}^2 & l_{nq}^2 \\ 1 & l_{pu}^2 & l_{pv}^2 & l_{pw}^2 & l_{pt}^2 & l_{pq}^2 \end{vmatrix} = 0.$$

4. Основной закон равновесной термодинамики $dU = TdS - pdV$ может быть переписан в конечной форме

$$A_{ik}^{ST} = T_k (S_i - S_k) + U_k - U_i,$$

$$\text{где } A_{ik}^{ST} = - \int_i^k p dV = - \int_i^{i^*} p_{S=S_i} dV - \int_{i^*}^k p_{T=T_k} dV -$$

работа, совершаемая над термодинамической системой при переходе из состояния i в состояние i^* по адиабате и из состояния i^* в состояние k по изотерме.

Итак, каноническая форма

$$A_{ik}^{ST} = T_k (S_i - S_k) + U_k - U_i;$$

феноменологически инвариантная форма

$$\text{ранг } (r, s) = (3, 3)$$

$$\forall i, k, m \in \mathfrak{M}, \quad \forall u, v, w \in \mathfrak{N}$$

$$\mathcal{D}_{ikm,uvw}^1 (A_{iu}^{ST}, A_{iv}^{ST}, \dots, A_{mw}^{ST}) = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & A_{iu}^{ST} & A_{iv}^{ST} & A_{iw}^{ST} \\ 1 & A_{ku}^{ST} & A_{kv}^{ST} & A_{kw}^{ST} \\ 1 & A_{mu}^{ST} & A_{mv}^{ST} & A_{mw}^{ST} \end{vmatrix} = 0$$

при дополнительном условии $\forall k \in \mathfrak{M} \quad A_{kk}^{ST} = 0$.

Итак, мы видим, что различные фундаментальные физические законы, относящиеся к различным разделам физики (к евклидовой геометрии, к нерелятивистской и релятивистской механике, к электродинамике), будучи записанными в феноменологически инвариантной форме, имеют одинаковое строение, определяемое рангом физической структуры, и не зависят от конкретной физической интерпретации тех физических объектов, отношения между которыми они описывают.

Таким образом, всего-навсего переписывая хорошо известные физические законы в новых понятиях и обозначениях, мы замечаем, что многие внешне совершенно различные законы построены по некоторому единому плану, отражающему глубокое единство и удивительную внутреннюю самосогласованность законов, лежащих в основании физического мира. Но переход от канонической формы к феноменологически инвариантной позволяет не только увидеть единство физики и убедиться в том, что она возникает из одного общего корня, роль которого играет физическая структура, но и последовательно, по единой программе ввести основные физические величины. Так, зная ускорения $a_{i1}^-, a_{1\alpha}, a_{11}^-$, мы находим массу тела m_i и силу $\mathcal{F}_\alpha$ по общим формулам, которые в случае ранга $(2, 2)$ имеют наиболее простой вид: отношение $\frac{a_{11}^-}{a_{i1}^-}$ для массы m_i и отношение $\frac{a_{1\alpha}}{a_{11}^-}$ для силы $\mathcal{F}_\alpha$. Точно так же, зная величины сил токов $\mathcal{J}_{i1}^-$,

$\mathcal{I}_{1\alpha}, \mathcal{I}_{2\alpha}, \mathcal{I}_{1\bar{1}}, \mathcal{I}_{2\bar{1}}$, мы находим сопротивление проводника R_i , внутреннее сопротивление ρ_α и электродвижущую силу $\mathcal{E}_\alpha$ источника тока α по аналогичным общим формулам, вид которых так же, как и само выражение для фундаментального закона, не зависит от физической природы объектов и определяется рангом физической структуры.

Основная область приложения теории физических структур — это феноменологическая физика, т. е. та область физики, в которой вводятся основные физические понятия и величины. Строго говоря, этот раздел физики еще должен получить права гражданства, так как в настоящее время мало кого интересует, как логически могут быть введены те или иные понятия, законы и величины. Большинство физиков искренно считает, что такие фундаментальные для всей физики понятия и величины, как пространство, время, масса, энергия, электрический заряд и т. п., вносятся в физику «руками» как нечто само собой разумеющееся, общеизвестное и самоочевидное. На самом же деле появление в физике этих понятий является далеко не тривиальным следствием факта существования в мире так называемой феноменологической симметрии, позволяющей подвести под главное здание физики надежный и строго обоснованный фундамент и понять, почему физический мир является именно таким, а не иным.

Итак, к феноменологической физике относятся такие фундаментальные разделы, как

1) *хронометрия*, в которой показывается, как возникает важнейшее для всей физики понятие — время (физическая структура ранга 3 на множестве событий, происходящих в одной и той же точке);

2) *трехмерная евклидова геометрия*, в которой возникает трехмерное евклидово пространство как физическая структура ранга 5 на множестве произвольно расположенных тел;

3) *теория относительности*, объектом изучения которой являются отношения между произвольными событиями в различных системах отсчета, в которой показывается, что «принцип постоянства скорости света» является следствием суперпозиции физических структур одномерного времени и трехмерного евклидова пространства;

4) *кинематика* — теория движения (суперпозиция физических структур одномерного времени и одномерного евклидова пространства на множестве упорядоченных событий);

5) *механика точки*, в которой возникают такие важнейшие понятия, как масса, сила, инерциальная система от-

счета (физическая структура ранга (2, 2) на множестве тел и акселераторов);

6) феноменологическая *электродинамика*, порождающая понятия электрического заряда и тока, тензора электромагнитного поля;

7) равновесная *термодинамика*, в которой показывается, как из физической структуры ранга 3 на множестве термодинамических состояний возникают понятия температуры, энтропии, внутренней энергии.

К феноменологической физике следует также отнести и *теорию размерности*, представляющую собой определенный раздел теории физических структур.

Но программа построения фундамента для всей физики не сводится только к строгому логическому анализу основных физических понятий и фундаментальных законов. Следующая задача состоит в том, чтобы найти и сформулировать те исходные физические принципы, из которых можно получить, как следствие, все основные понятия и уравнения традиционной теоретической физики. Эти принципы не являются независимыми, а образуют некоторую иерархическую систему, т. е. имеет место следующая ситуация:

физические принципы «первого поколения» могут быть сформулированы на языке физических понятий и величин, возникших в рамках феноменологической физики (теории физических структур);

для формулировки физических принципов «второго поколения» необходимы физические понятия и величины, возникающие в рамках физических теорий первого поколения, и т. д.

Необходимо перекинуть надежный мостик между опирающейся на опыт феноменологической физикой и традиционной теоретической физикой, к которой относятся: физическая теория первого поколения — аналитическая механика; теории второго поколения — статистическая физика, теория классических электромагнитного и гравитационного полей и квантовая механика; теория третьего поколения — квантовая теория поля.

Переход от теории физических структур к физическим теориям первого, второго и третьего поколений может быть осуществлен достаточно естественным путем благодаря существованию некоторого эвристического принципа, *принципа сохранения формальной структуры*, — еще одного яркого проявления единства различных разделов физики. Этот принцип позволяет строить физические теории следующих поколений, сохраняя формализм теории предыдущего по-

коления и вкладывая в него новое содержание, являющееся расширением старых понятий.

В качестве примера рассмотрим переход от теории физических структур к аналитической механике. В рамках теории физических структур второй закон механики Ньютона

$$m_i a_{i\alpha} = \mathcal{F}_\alpha \quad (7)$$

получается как естественное следствие из существования физической структуры ранга (2, 2). В декартовых координатах имеем

$$m \frac{dv_x}{dt} = \mathcal{F}_x, \quad m \frac{dv_y}{dt} = \mathcal{F}_y, \quad m \frac{dv_z}{dt} = \mathcal{F}_z.$$

Переходя к произвольным криволинейным координатам $x^i = x^i(x, y, z)$, $i = 1, 2, 3$, получаем

$$m \left(g_{ik} \frac{dv^k}{dt} + \Gamma_{i, kn} v^k v^n \right) = \mathcal{F}_i = - \frac{\partial U}{\partial x^i},$$

или

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial}{\partial v_i} \left(\frac{m}{2} g_{kn} v^k v^n - U \right) - \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\frac{m}{2} g_{kn} v^k v^n - U \right) = 0.$$

Полагая $L = \frac{m}{2} g_{kn} v^k v^n - U = T - U$, переписываем закон (7) в окончательном виде

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial L}{\partial v^i} - \frac{\partial L}{\partial x^i} = 0.$$

Если теперь оставить неизменной форму уравнения и вместо T и U для одной частицы взять кинетическую и потенциальную энергии системы с произвольным числом степеней свободы, то получим основное уравнение аналитической механики и тесно связанный с ним принцип Гамильтона.

Заметим, что вопрос о математическом основании аналитической механики, классической и квантовой теории поля, статистической физики и квантовой механики поставлен уже давно и в принципе решен, хотя, по-видимому, нужно приложить еще много труда, чтобы, опираясь на принцип сохранения формальной структуры, сформулировать исходные принципы традиционной теоретической физики в предельно ясной и отчетливой форме.

Итак, решение очень частной задачи выражения массы и силы через измеряемые в опыте величины ускорений привело к возникновению теории физических структур, которая может служить, как мы видели, программой обоснования физики. Никакого нового физического знания при этом не получается, ибо такова вообще специфика программ обосно-

вания знания. Имеет место лишь переизложение с единых позиций уже построенных физических теорий. Но несмотря на то, что в ходе обоснования знания не предсказывается никаких новых физических эффектов, эта деятельность несомненно значима, в частности для преподавания физики, ибо дает представление о совокупности физических теорий как некотором структурированном целом.

Однако наряду с тем, что теория физических структур играет хотя и важную, но в некотором роде подсобную по отношению к физике роль, с ней связаны и собственно *исследовательские* задачи — ее аппарат позволяет сформулировать такие математические задачи, которые раньше не ставились. Эта ситуация достаточно типичная для судеб математических теорий, возникших на базе решения содержательных задач: исследования впоследствии развиваются, как правило, в двух существенно разных направлениях ⁷. Одно из них — развитие средствами математики соответствующей предметной теории механики, физики, экономики и т. п., другое — развитие самой математической теории, как это было с математическим анализом, уравнениями математической физики, линейным программированием и т. п. Возможность такого двойного функционирования математизированного знания — это частное проявление феномена рефлексивной симметрии знания, описанного М. А. Розовым ⁸.

**ТЕОРИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СТРУКТУР
КАК ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПРОГРАММА
В МАТЕМАТИКЕ**

Рассмотрим в качестве первого примера следующую математическую задачу: найти такую функцию $m + n$ переменных

$$a_{i\alpha} = f(x_i^1, \dots, x_i^m; \xi_\alpha^1, \dots, \xi_\alpha^n), \tag{8}$$

чтобы при заданных целых натуральных числах (r, s) (пара (r, s) называется рангом физической структуры на двух множествах) $r \cdot s$ функций

$a_{i\alpha}$	$a_{i\alpha_1} \dots a_{i\alpha_{s-1}}$
$a_{i_1\alpha}$ $a_{i_{r-1}\alpha}$	$a_{i_1\alpha_1} \dots a_{i_1\alpha_{s-1}}$ $a_{i_{r-1}\alpha_1} \dots a_{i_{r-1}\alpha_{s-1}}$

В математике во второй половине прошлого века были открыты различные геометрии (евклидова, аффинная, проективная, геометрии Римана и Лобачевского). В связи с этим возникла идея построения единой геометрии, объединяющей как частные случаи все геометрии, известные раньше. Но для этого было необходимо найти то общее, что присуще всем известным к тому времени геометриям. Оказалось, что таким объединяющим все геометрии началом является группа тех или иных преобразований.

В 1972 г. в своей знаменитой «Эрлангенской программе» Феликс Клейн провозгласил: «Дайте мне группу, и я построю вам соответствующую ей геометрию». При этом под геометрией понималась теория инвариантов данной группы, т. е. теория, изучающая свойства фигур, сохраняющиеся при всех преобразованиях данной группы. Таким образом, была установлена глубокая связь между двумя, казалось бы, далекими математическими структурами: геометрией, с одной стороны, и алгеброй (теорией групп) — с другой. Значение этой программы для развития геометрии трудно переоценить.

Однако какую группу выбрать из их необозримого количества для построения геометрии? Ведь если даже ограничиться преобразованиями изометрии, сохраняющими длину, то и в этом случае число возможных групп лавинообразно растет с ростом числа групповых параметров, и такие поистине великие метрические геометрии, как евклидова геометрия, геометрии Лобачевского и Римана, симплектическая геометрия, оказываются погребенными среди огромного числа случайных «экзотических» геометрий, подавляющее большинство которых к тому же оказываются вырожденными.

Теория физических структур позволяет взглянуть на существующие геометрии с иной точки зрения и выявить единство различных геометрий на другой основе: вместо провозглашенной Клейном группы преобразований она выделяет в качестве универсального свойства всех метрических геометрий феноменологическую симметрию. При этом требование феноменологической инвариантности оказывается существенно более жестким, нежели требование групповой симметрии, в результате чего все вырожденные геометрии отсеиваются с самого начала, а невырожденная метрика оставшихся геометрий может быть выражена как решение

системы функциональных уравнений, исследованных В. Х. Львом¹¹, в виде формул, содержащих некоторое число параметров. Придавая этим параметрам различные предельные значения, мы сможем получить метрики хорошо известных геометрий (евклидова геометрия, геометрия Римана и Лобачевского, симплектическая геометрия) и, кроме того, метрики нескольких новых «экзотических» геометрий, почти совершенно не изученных, полученных впервые Г. Г. Михайличенко¹² для размерности $n = 2$:

$$a_{ik} = [(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2] e^{\gamma \operatorname{arctg} \frac{x_i - x_k}{y_i - y_k}};$$

$$a_{ik} = [(x_i - x_k)^2 - (y_i - y_k)^2] e^{\gamma \operatorname{arcth} \frac{x_i - x_k}{y_i - y_k}}; a_{ik} = (y_i - y_k) e^{\frac{x_i - x_k}{y_i - y_k}}.$$

Итак, всю традиционную геометрию (дополненную не которыми «экзотиками») можно рассматривать как теорию физических структур на одном множестве.

Распространение идеи феноменологической симметрии на два множества различной природы (множество тел и множество акселераторов в механике, множество проводников и множество источников тока в электродинамике, множество заряженных тел и множество электрических полей в электростатике и т. п.) открывает новые возможности, но уже не только в области традиционной геометрии, но и главным образом в области феноменологической физики.

Теория физических структур в такой расширенной формулировке представляет собой эффективный способ установления единственно возможных форм первичных физических законов и вытекающих отсюда общих правил построения основных понятий и физических величин как некоторых феноменологических инвариантов до какой бы то ни было конкретной физической интерпретации¹³.

Таким образом, перефразируя тезис Клейна, можно сказать, что традиционная геометрия и феноменологическая физика представляют собой различные проявления одного и того же, ибо вырастают они из одного и того же источника — из феноменологической симметрии. Задайте мне тип физической структуры, и я построю вам либо все соответствующие ему геометрии, либо все соответствующие ему формальные соотношения и феноменологические инварианты, описывающие первичные законы, основные понятия и величины феноменологической физики.

¹ Румер Ю. Б., Фет А. И. Теория унитарной симметрии. М., 1970. С. 7—8.

² Бурбаки Н. Очерки по истории математики. М., 1963. С. 246.

³ Кулаков Ю. И. Элементы теории физических структур. Новосибирск, 1968; *Он же*. О теории физических структур // Записки научных семинаров ЛОМИ. Т. 127. Л., 1983. С. 103—151. *Kulakov Ju. I., Protasiewicz T. I.* Phenomenological symmetry and the foundations of physics // *Int. logic review (Italy)*. 1973. № 7. P. 99—101.

⁴ Герц Г. Принципы механики, изложенные в новой связи. М., 1959. С. 16—19.

⁵ Пуанкаре А. Идеи Герца в механике // Принципы механики, изложенные в новой связи. М., 1959. С. 311, 316.

⁶ Кулаков Ю. И. Математическая формулировка теории физических структур // Сиб. мат. журнал. 1971. Т. XII. № 5. С. 1142.

⁷ Подробнее см.: Сычева Л. С. Современные процессы формирования наук. Новосибирск, 1984. С. 76—82.

⁸ Розов М. А. О типах связей научных дисциплин // Всесоюзная конференция «Методологические аспекты взаимодействия общественных, естественных и технических наук в свете решений XXV съезда КПСС». Москва; Обнинск, 1978. С. 316—319.

⁹ *Mikhaylitchenko Y. Y.* Géométries à deux dimensions dans la théorie de structures physiques // *C. R. Acad. Sci. Paris*, 1981. Т. 293. Serie 1. P. 529.

¹⁰ Лев В. Х. Двумерные и трехмерные геометрии в теории физических структур // Вычислительные системы. Новосибирск: Изд. Ин-та мат. СО АН СССР, 1987. № 112.

¹¹ Там же.

¹² *Mikhaylithenko J. J.* Géométries...

¹³ Единственность форм первичных физических законов следует из единственности решения системы уравнений (8) и (9), относительно двух неизвестных функций Φ и f , доказанной в работах: Кулаков Ю. И. Математическая формулировка теории физических структур. С. 1142; Михайличенко Г. Г. Об одной задаче в теории физических структур // Сиб. мат. журнал, 1977. Т. XVIII. № 6. С. 1342; Лев В. Х. Двумерные и трехмерные геометрии в теории физических структур // Вычислительные системы, № 112. Новосибирск: Изд. Ин-та мат. СО АН СССР, 1987.

С. Г. КОРДОНСКИЙ

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ПРОГРАММЫ В БИОЛОГИИ. ПРОБЛЕМА СООТВЕТСТВИЯ ПАРАДИГМАЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ПРАКТИКЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Программы исследований, как известно, представляют собой сложные образования, которые могут быть рассмотрены и как алгоритмы исследовательских действий с эмпирическими объектами, и как способы осмысления результатов