



# ПРИНЦИП МАХА И НЕЛОКАЛЬНОСТЬ

А.В. Белинский, М.Х. Шульман

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Институт исследования проблем времени

belinsky@inbox.ru, shulman@dol.ru

## 1 Дальнодействие и близкодействие

В классической физике основоположниками концепции близкодействия обычно считают Декарта и Фарадея. При этом подразумевается, что

- взаимодействия передаются через особых материальных посредников,
- такие взаимодействия осуществляются с конечной скоростью. Напротив, принято считать, что, согласно концепции дальнодействия, тела должны действовать друг на друга
- без материальных посредников (через “пустоту”) на любом расстоянии,
- такие взаимодействия осуществляются с бесконечно большой скоростью.

С нашей точки зрения, противопоставление двух упомянутых концепций не имеет под собой незыблемого основания. В самом деле, когда говорят о взаимно удаленных телах, имеют в виду наличие произвольно большого разделяющего их 3-мерного расстояния. Однако такая мера удаленности имеет относительный характер – эта мера может стать сколь угодно малой, если рассматривать эту же конфигурацию двух тел не в лабораторной, а в быстро движущейся системе отсчета.

В классической электродинамике, как известно, однозначно определяются электрическое  $\vec{E}$  и магнитное  $\vec{B}$  поля, для которых формулируются представления об электрическом скалярном потенциале  $\varphi$  и магнитном вектор-потенциале  $\vec{A}$ . Векторы электрического и магнитного поля можно разделить на две компоненты – *продольную* (безвихревую) с равным нулю ротором и *поперечную* (соленоидальную) с равной нулю дивергенцией.

Из уравнений Максвелла следует, что продольная компонента магнитного поля равна нулю, тогда как продольная компонента электрического поля есть *электростатическое* (т.е. *дальнодействующее*) поле, созданное соответствующим распределением заряда. Преобразованные так уравнения поля позволяют вполне законным образом оперировать *мгновенным* взаимодействием, т.е. использовать концепцию дальнодействия.

В 1945 г. выдающиеся американские физики Дж. Уилер и Р. Фейнман развили теорию прямого (непосредственного и мгновенного) межчастичного взаимодействия между заряженными частицами, в которой исходили, в частности, из того, что:

- поле, действующее на данную частицу, обусловлено только *непосредственным* действием других частиц;
- это поле излучения описывается полусуммой опережающего и запаздывающего решений Лиенарта-Вихерта уравнений Максвелла, симметричной по отношению к прошлому и будущему.

Возмущение, создаваемое ускоряемым *зарядом*, приводит к движению каждой частицы *поглотителя*, которая из-за этого генерирует поле – полусумму опережающего и запаздывающего членов. Сумма опережающих воздействий всех частиц поглотителя, определенная в пробной точке вблизи от исходного заряда, дает результирующее поле. Оно воздействует на источник возмущения с силой, которая является конечной, *одновременной с моментом возмущения* и точно соответствующей по величине и направлению той силе, которая отвечает передаче энергии от источника к окружающей среде.

Таким образом, в теории Уилера – Фейнмана возникает парадигма дальнего действия, т.е. мгновенного действия на произвольном расстоянии. Эта теория не только предсказывает те же результаты, что и стандартное решение системы уравнения Максвелла, но и эффективно описывает эффект т.н. *радиационного трения*.

Выкладки Уилера – Фейнмана, связанные с использованием опережающих и запаздывающих потенциалов, весьма громоздки. С нашей точки зрения, чтобы обосновать дальнее действие электрических зарядов, достаточно учесть равенство нулю “собственной” длительности обмена носителями (фотонами, движущимися со скоростью света) электромагнитного поля, т.е. нелокальность поля.

## 2 Принцип Маха и нелокальность

Согласно одной из формулировок принципа Маха, инерция объекта определяется его взаимодействием с остальной вселенной: тело испытывает силу инерции, когда оно ускоряется относительно центра масс всей вселенной.

В работе [1] г. была представлена нерелятивистская упрощенная модель гомогенной расширяющейся Вселенной, причем потенциал гравитационного поля описывается вектором, а не тензором. В ней описывается теория гравитации, приписывающая инерцию индуктивному влиянию удаленной материи. Эта теория, в частности, отличается от ОТО тем, что принцип эквивалентности оказывается следствием теории, а не начальной аксиомой. Позже, в работе [2] была предложена модель с модифицированным тензорным гравитационным потенциалом, в которой материя влияет на метрику не только непосредственно, но и через дополнительно введенное скалярное поле.

Очень важно, однако, отметить, что всех подобных теориях инерциальная реакция окружающих тело объектов может распространяться только с



конечной скоростью (не быстрее скорости света), то есть инертные свойства тела не могут определяться всеми другими телами Вселенной.

В самом деле, если гравитационное поле всей Вселенной является источником инерции, то оно должно характеризоваться *мгновенной*, а не запаздывающей реакцией на движение любого пробного тела (как это и имеет место в действительности). Вышеприведенная концепция нелокальности и дальнего действия применительно к *электромагнитному* полю основана на идее свести локальное взаимодействие между частицами к глобальному взаимодействию частицы с окружающей Вселенной и восходит к идее Фоккера, согласно которой обычный *вектор-потенциал* электромагнитного поля представляет собой не что иное, как сумму “*мгновенных*” *влияний* на пробный заряд со стороны всех остальных зарядов Вселенной. Эту идею вполне естественно попытаться распространить на гравитационное поле. Подобная попытка описана, в частности, в публикации [3]. Однако ее автор, следуя принципу Маха, пытался в виде аналогичной суммы представить *массу* пробной частицы, так что величина массы при этом оказалась бы зависящей от состава Вселенной.

Нам подобный подход представляется методически неверным, т.к. *вектор-потенциал* играет роль, аналогичную удельному (на единицу заряда) *импульсу* (а не массе). Чтобы увидеть это, рассмотрим описание электрически заряженной частицы в электромагнитном поле.

Действие для системы “частица + поле” содержит три слагаемых. Первое слагаемое отвечает механическому движению частицы в отсутствие поля, второе слагаемое – взаимодействию заряженной частицы с полем, а третье зависит только от самого поля. Если не учитывать вклад третьего слагаемого, то влияние поля на инерциальные свойства движения частицы приводит к тому, что к энергии частицы алгебраически добавляется слагаемое  $e\varphi$  ( $e$  – заряд,  $\varphi$  – скалярный электрический потенциал поля), а вместо механического импульса  $\vec{p} = m\vec{v}$  следует ввести обобщенный импульс, т. е. производную от функции Лагранжа по скорости  $\vec{P} = \vec{p} + e\vec{A}/c$  (где  $\vec{A}$  – вектор-потенциал поля,  $c$  – скорость света).

Таким образом, выражение для *обобщенного импульса* содержит два *равноправных* слагаемых, одно из которых обусловлено *механической* компонентой инерции, а другое – *электромагнитной* компонентой. Учитывая, что вектор-потенциал есть величина, ротор которой равен вектору магнитного поля, мы видим прямое подтверждение тому, что поток магнитного поля электрической системы играет роль, аналогичную механическому импульсу частицы.

Если рассматривать именно вектор-потенциал в качестве суммы *влияний* на пробный заряд всех остальных зарядов Вселенной, и если вектор-потенциал и *механический импульс* частицы *равноправным* образом *суммируются* в соответствующих *физических уравнениях*, то возникает *впол-*

не естественная мысль: и механический импульс частицы следует рассматривать как сумму механических влияний на пробную частицу всех остальных частиц Вселенной! Эта идея – вполне в духе принципа Маха – оказывается тривиально верной, поскольку обобщенный импульс пробной частицы в сумме с импульсом всех остальных частиц Вселенной всегда дает одну и ту же сохраняющуюся величину (если Вселенную рассматривать как замкнутую систему), т.е. непосредственно выражается через эту сумму.

При таком подходе в сумме, представляющей обобщенный импульс  $\vec{P} = m\vec{v} + e\vec{A}/c$ , роль вектор-потенциала  $\vec{A}$  (деленного на скорость света), как нетрудно заметить, оказывается вполне аналогичной роли вектора скорости частицы  $\vec{v}$ , а роль электрического заряда  $e$  – роли гравитационного заряда  $m$ . Симметричная роль гравитационного и электрического зарядов в феномене инерции подтверждается и полной аналогией в выражениях для напряженности поля от заряда, вытекающих из закона Кулона и закона всемирного тяготения.

Можно думать, что именно сохранение обобщенного импульса и является обоснованием представления Фоккера о вектор-потенциале как о сумме вкладов отдельных взаимодействий.

### 3 Заключение

Таким образом, принцип Маха, согласно которому инерция объекта определяется его гравитационным взаимодействием с остальной вселенной, с необходимостью должен быть дополнен представлением о мгновенности такого взаимодействия, основанного на концепции 4-мерной нелокальности Вселенной.

### Литература

- [1] Sciama D.W. On the origin of inertia. MNRAS, 1953, v.113, 34–42.
- [2] C. Brans and R. H. Dicke. Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation. Phys. Rev. 124, 925 – Published 1 November 1961.
- [3] Дж. В. Нарликар. Инерция и космология в теории относительности Эйнштейна, пер. с английского. В книге “Астрофизика, кванты и теория относительности”, М., Мир, 1982. С. 498 – 534.