

ТРАЕКТОРИИ РЕДЖЕ И ФОРМА АДРОНОВ

А. Б. Мигдал

Приведены аргументы, свидетельствующие о том, что адроны имеют вытянутую форму.

Траектории, Режде т. е. кривые, изображающие зависимость углового момента от квадрата массы частицы имеют две удивительные особенности: хорошей точностью — это прямые линии и, кроме того, их наклон для барионных кривых почти не отличается от наклона мезонных траекторий.

Как известно, линейный ход траекторий интерпретируется следующим образом. В случае мезона между кварком и антикварком протягивается глюонная струна. Энергия кварков определяет только "концевой эффект", не зависящий от длины l струны. Зависящая от l и от углового момента часть массы определяется энергией глюонного поля.

Для больших моментов справедливы соотношения:

$$M = 2 \int_0^{l/2} \frac{\sigma(x) dx}{\sqrt{1 - \omega^2 x^2}}; \quad I = 2 \int_0^{l/2} \frac{\sigma(x) \omega x^2 dx}{\sqrt{1 - \omega^2 x^2}}, \quad (1)$$

где $\sigma(x)$ — натяжение струны, которое у концов может зависеть от расстояния x до центра струны, ω — угловая скорость. Длина струны определяется из условия минимума M при заданном I . Пренебрегая зависимостью σ от x нетрудно получить, что минимальное значение M^2/I достигает при $\omega l/2 = 1$. При этом

$$M^2 = 2\pi\sigma I = (\pi\sigma l/2)^2; \quad I = \pi\sigma l^2/8 \quad (2)$$

Из наблюдаемого значения $\alpha' = dI/dM^2$ следует $\sigma = (400 \text{ МэВ})^2$

Так объясняется линейный ход мезонных траекторий, но почему наклон мезонных траекторий совпадает с наклоном барионных?

По-видимому, единственное объяснение параллельности барионных и мезонных траекторий, сохраняющее идею глюонной струны, состоит в том, что в барионе при образовании струны два кварка расположены преимущественно у одного, а третий у другого конца струны. Поскольку два кварка, как источники глюонного поля при $N_c = 3$ эквивалентны одному антикварку, то барионная струна с точностью до концевых эффектов не отличается от мезонной, что и означает одинаковый наклон траекторий.

Из анализа спектров тяжелых мезонов, следует, что натяжение струны между тяжелыми кварками близко к тому, которое найдено из траекторий Режде. Таким образом, натяжение струны не зависит от массы и квантовых чисел кварков.

Еще одна загадка. Почему постоянный наклон траекторий сохраняется вплоть до самых малых значений углового момента?

Квантование идеальной струны приводит к зависимости $M^2 \sim 2\pi\sigma I$ вплоть до $I = 1$, тогда как для неизгибающегося стержня I^2 заменяется на $I(I+1)$. Этот результат можно интерпретировать, как увеличение энергии от включения поперечной жесткости. Возможно эта трудность снимается тем, что поперечная жесткость глюонной струны, соединяющей кварки мала — энергия искривленной струны пропорциональна, по-видимому не квадрату, а четвертой степени отношения поперечного размера к радиусу кривизны.

Приведем еще один возможно более убедительный аргумент в пользу вытянутых адронов. Область, в которой заключено глюонное поле, а следовательно и кварки, имеет размеры порядка радиуса конфайнмента R_c (масштаб, на котором кулоновское взаимодействие между кварками сменяется законом σR) как показывают результаты численных экспериментов $R_c \cong (600 \div 700 \text{ МэВ})^{-1} \cong 0,3 F$. Эта величина значительно меньше, чем нуклонный электромагнитный "радиус", который определяется пионным облаком ($R_F \cong 0,8 F$).

Кинетическая энергия кварков в этом объеме вносит большой вклад в массу: $2,04N_c/R_c \cong \cong 4$ ГэВ для барионов и $2,04 \cdot 2/R_c = 2,7$ ГэВ для мезонов (для граничных условий MIT).

Уменьшение масс до наблюдаемого значения должно получиться после учета взаимодействия валентных кварков с кварковым конденсатом, т. е. в результате возбуждения пионного поля. Бариион, состоящий из трех кварков непосредственно взаимодействует с пионным полем, поскольку можно составить псевдоскаляр генерирующий пионное поле ($\sim \sigma \nabla \pi$). Но сферический мезон может генерировать пионное поле только за счет флуктуаций кварковой плотности. Его масса должна была бы приблизительно равняться приведенной выше величине. Если же мезон вытянут, эти флуктуации возрастают и кварк и антикварк генерируют "дипольное" пионное поле. Взаимодействие мезона с кварковым конденсатом увеличивает и может понизить массу до наблюдаемой величины.

Но даже без взаимодействия с пионным полем адрону, по-видимому, выгодна вытянутая форма. Действительно, анализ возникновения глюонной струны^{1, 2} приводит к следующему заключению. Необходимое условие существования струны — быстрый рост глюонной энергии при увеличении минимального масштаба ρ глюонного поля (например, поперечного размера струны) вблизи $\rho \cong R_c$. Поэтому нулевые колебания формы адрона происходят асимметрично. Амплитуда сферических колебаний гораздо меньше, чем амплитуда колебаний с образованием струны. В первом случае минимальный масштаб увеличивается по сравнению с R_c , тогда как во втором поперечный размер остается равным R_c и увеличивается только длина струны. Асимметрия колебаний приводит к эффективной вытянутости. Кроме того, можно ожидать что уже в равновесном состоянии предпочтительна вытянутая форма.

Действительно, "струнная" интерпретация траекторий Редже приводит к заключению о неустойчивости сферической формы адрона — минимальное вращение вытягивает адрон (согласно (2) уже при $l = 1, l = 2, 6 R_c$). Поясним это простым расчетом, который представляет собой отнюдь не доказательство, а наводящее соображение.

Предположим, что адрон имеет форму эллипсоида с полуосями a и b , тогда массу бариона можно записать в виде

$$M = N_c \frac{1,44}{a} \left\{ 1 + \frac{0,72}{\xi} + \frac{0,3}{\xi^2} \right\}^{1/2} + \sigma \xi a, \quad (3)$$

где $\xi = b/a$. Первое слагаемое представляет собой кинетическую энергию кварков (см.³ и ссылки там), а второе — энергию глюонного поля. Масса мезона получится заменой N_c на 2. Предположим, что минимизация энергии по поперечному размеру соответствует значению $a = R_c$. Тогда форма адрона определится минимизацией выражения (3) по большой полуоси.

Подставляя $\sigma = (400 \text{ МэВ})^2$, $R_c = (600 \text{ МэВ})^{-1}$ получим $\xi = 2,2$ для бариона и $\xi = 1,8$ для мезона. До построения теории адрона трудно оценить как изменится вытянутость при последовательном учете пионного поля.

Эта оценка основывалась на представлении об адроне, как о мешке, в котором движется кварк. Между тем в случае безмассовых кварков их движение определяется движением созданного ими глюонного поля. Кварк обозначает точку окончания струны и неопределенность его координаты соответствует ее квантовым флуктуациям. Поэтому масса адрона определяется энергией нулевых колебаний струноподобного глюонного поля и не требуется добавлять кинетическую энергию кварков в этом объеме.

Разумеется вытянутость нуклона не приводит к появлению электрического квадрупольного момента, поскольку оператор квадрупольного момента, составленный из матриц Паули тождественно равен нулю. В синглетном состоянии дейтона ориентация вытянутости нейтрона и протона произвольна, однако в триплетном состоянии должна возникнуть корреляция между этими направлениями, которая может привести к различию сил взаимодействия

в триплетном и синглетном состояниях. Вытянутость адронов должна проявиться в опытах по рассеянию нуклонов на нуклонах и в мезон-нуклонном рассеянии.

Нам кажется, что приведенные соображения достаточно убедительны чтобы искать проявления вытянутости адронов экспериментально, не дожидаясь построения последовательной теории адронов, которая пока далека от завершения.

Мне приятно поблагодарить В.Ю.Борю, А.М.Полякова и С.Б.Хохлачева за полезные обсуждения.

Литература

1. Migdal A.B., Хохлачев С.Б., Шур Л.Н. ЖЭТФ, 1986, 91, 745.
2. Migdal A. B. In: Proceedings of conference on nonlinear problems in quantum field theory Hungary, 1986.
3. Clement G., Maamache M. Ann. of Phys., (N.V.) 1985, 165, 1.

Институт теоретической физики им. Л.Д.Ландау
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
3 сентября 1987 г.
