



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 98-35  
ОТФ

В.А. Петров

## ДИФРАКЦИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Краткая версия доклада на XX Международном совещании по фундаментальным проблемам физики высоких энергий и теории поля (24-26 июня 1997 г., Протвино). Английский вариант опубликован в трудах совещания.

Протвино 1998

**Аннотация**

Петров В.А. Дифракция частиц при высоких энергиях: Препринт ИФВЭ 98-35. – Протвино, 1998. – 4 с., библиогр.: 8.

Дан краткий идейно-исторический обзор проблематики дифракционного рассеяния при высоких энергиях.

**Abstract**

Petrov V.A. Particle Diffraction at High Energies: IHEP Preprint 98-35. – Protvino, 1998. – p. 4, refs.: 8.

A brief ideological and historical review of problems of high energy diffractive scattering is given.

Дифракция света была описана итальянским физиком Гримальди в его книге, опубликованной в 1665 г. Одно из первых (и неверных) объяснений было дано Ньютоном, который также внес большой вклад в экспериментальное открытие и изучение новых дифракционных явлений. Ньютоновское объяснение дифракции основывалось на корпускулярной теории света. Однако в начале XIX века знаменитый “парадокс Пуассона” (предсказание светового пятна в центре геометрической тени — следствие волновой теории света Френеля) и его экспериментальное подтверждение упрочили представление о волновой природе света на сто лет, пока Эйнштейн и Штарк не открыли, что свет проявляет и свойства, присущие частицам.

Из наблюдения дифракционной картины можно судить о размерах и форме рассеивателя. В настоящее время эта область является высокоразвитой частью прикладной оптики с бесчисленными применениями в технике.

Со времени фундаментальной догадки, сделанной в 1923 г. Луи де Бройлем, о волновых свойствах материи, подтвержденной экспериментально Штерном в Германии и Дэвиссоном и Джермером в США, это специфическое квантовое явление нашло много применений. Но главным идейным выводом стало то, что волновые или корпускулярные свойства одновременно присущи всем природным явлениям, хотя тот или иной аспект может доминировать в зависимости от условий.

Физика высоких энергий считается обычно синонимом “физики частиц”. Новые явления в этой области связаны либо с открытием новых частиц, либо с некоторыми типично “частице-подобными” эффектами, такими как, скажем, “бьеркеновский скейлинг” в глубоконеупругом рассеянии, или струи при больших  $p_{\perp}$  и т.п. На пространственно-временном языке эти кинематические режимы означают прощупывание малых расстояний.

Однако существует направление в физике высоких энергий, которое даже при высоких энергиях связано не с малыми, а скорее, с большими (по ядерным масштабам) расстояниями. Это явления, подобные рассеянию (упругому или инклюзивному) адронов на малые углы. Хорошо известная черта этих процессов состоит в том, что угловое распределение вероятности рассеянных частиц дает типично дифракционную картину с максимумом при нулевом угле, сопровождающемся провалом и в некоторых случаях вторым максимумом.<sup>1</sup>Здесь мы имеем дело с волновыми

---

<sup>1</sup>Интересное обсуждение “дифракции при высоких энергиях” содержится в [1].

свойствами адронов. Из этого распределения можно сделать заключение о размере рассеивателя или, правильнее, об “области взаимодействия”.

Интересной особенностью этих “измерений размера” является то, что размер оказывается зависящим от энергии. В оптике это соответствовало бы зависимости видимого размера освещенного объекта от частоты (или длины волны) падающего света.

Современная теория ограничивает эту зависимость от энергии поперечного (по отношению к падающему пучку) размера “максимальным радиусом”,  $R_0 \approx (1/m_\pi) \log E$ , где  $m_\pi$  — масса пиона ( $1/m_\pi$  — знаменитый радиус Юкавы), а  $E$  — энергия в системе центра масс. Логарифмическая зависимость поперечного радиуса сильных взаимодействий была получена В. Гейзенбергом в рамках некоторой модели для столкновений нуклонов при высоких энергиях еще в 1952 г. Позже, в 1961 г., М. Фруассар получил тот же предел на более общих основаниях, и, наконец, А. Мартен дал в 1966 г. строгое доказательство, основанное на первых принципах квантовой теории поля. Общее определение радиуса сильных взаимодействий и нижние ограничения на его поведение были даны А. Логуновым и Нгуен Ван Хьеу [2].

Эксперименты [3] подтверждают зависимость от энергии поперечного радиуса взаимодействия, который слабо возрастает с ростом энергии (но лежит намного ниже радиуса Гейзенберга-Фруассара-Мартена,  $R_0$ ).

В то время как поперечный радиус взаимодействия можно извлечь из дифференциального сечения, что можно сказать о продольном размере области взаимодействия, или же о времени взаимодействия?

Теоретически проблема была поставлена в давней работе Вигнера в рамках нерелятивистской квантовой механики [4]. Можно также отметить работу [5]. При этом продольный размер был связан с некоторыми производными от фазы амплитуды рассеяния. Однако эта процедура требует знания амплитуды вне массовой оболочки.

Иной подход был предпринят в работе [6], где было оценено, что эффективная длина взаимодействия растет с энергией как  $E/m^2$ . Это очень интересно, поскольку при энергиях будущего Большого Адронного Коллайдера в ЦЕРНе (LHC) длина взаимодействия может достигнуть атомных масштабов.

К сожалению, в настоящее время неизвестно, как извлечь этот размер из измеряемых характеристик. Некоторые надежды относятся к ядерным мишеням, где более чем один нуклон может быть вовлечен во взаимодействие с “длинным” налетающим нуклоном.

Если все же представить себе, что размер и форма области взаимодействия извлечены из достаточно полного набора экспериментальных данных, тогда проблема в том, чтобы понять полученную информацию на основе современных теоретических представлений. Рассмотрим столкновение при высокой энергии в лабораторной системе отсчета, когда один адрон (на практике нуклон или ядро) находится в покое (“наблюдатель”), в то время как другой налетает на него. Зависимость от

энергии тогда в основном можно отнести к налетающему адрону, который выглядит длиннее в продольном направлении и шире в поперечных.

Не находится ли это в явном противоречии со специальной теорией относительности, которая предусматривает, что продольный размер должен убывать с ростом скорости, в то время как поперечные остаются неизменными? На самом деле, противоречия нет. Дело в том, что частица — квантовый объект, который едва ли похож на жесткую сферу как можно было бы воображать на классический манер. Это квантовая система, которая флуктуирует в различные виртуальные состояния, которые имеют свои собственные времена жизни и размеры. Последние вовсе не лоренц-инвариантны. Более того, максимальный радиус  $R_0$  относится к расстояниям между точками в поперечной плоскости, взятыми, вообще говоря, в различные моменты времени, а это вовсе не то же самое, что “мгновенный размер” в специальной теории относительности.

Квантовые флуктуации обладают специфическими характеристиками, которые следует соотносить с современными взглядами на микроструктуру частиц. Для сильновзаимодействующих частиц это квантовая хромодинамика (КХД). КХД дала многое для понимания явлений, связанных с малыми расстояниями (так называемые “жесткие процессы”).

К несчастью, КХД все еще не слишком эффективна в приложении к большим расстояниям (“мягкие” или дифракционные процессы). В рамках реджевского подхода делаются попытки получить главные редже-траектории по теории возмущений. Несмотря на определенный прогресс [7], остаются нерешенными серьезные проблемы [8]. Одна из этих проблем в том, что метод квантовых возмущений, который замечательно работает на малых расстояниях, отказывает на больших. Это связано с проблемой конфайнмента, т.е. отсутствия кварков и глюонов в асимптотических состояниях, детектируемых измерительной аппаратурой.

Может вполне случиться, что “частичный” подход, когда кварки и глюоны принимают участие в процессе рассеяния как составляющие сталкивающихся адронов, не является естественным для дифракционных явлений, более адекватных волновым аспектам. В этом случае более подходящим могло бы стать изучение некоторых (глюонных) полевых конфигураций, которые не поддаются обычным пертурбативным методам. Вот почему проекты типа TOTEM на LHC должно рассматривать не как неизбежную цену за точные измерения светимости, но скорее как уникальный источник информации о размерах и форме области взаимодействия адронов. Объяснение и описание их — труднейшая задача КХД.

В качестве заключения я хотел бы еще раз подчеркнуть, что экспериментальное изучение дифракционного адронного рассеяния крайне важно поскольку:

1. Зависящая от энергии форма области взаимодействия представляет интерес с общей квантовой и релятивистской точек зрения.
2. Интерпретация, объяснение и описание данных будет способствовать новому развитию КХД на больших пространственно-временных масштабах.

Это определенно связано с давней проблемой конфайнмента, который, как видим, важен не только при низких энергиях.

## Список литературы

- [1] Самохин А.П. — В кн.: Труды XVIII Совещания по физике высоких энергий и теории поля (26-30 июня 1995, Протвино). / Ред. В.А.Петров и др. — Протвино, 1996;  
Malecki A., Michalec M. and Palotta M. – Preprint LNF-97/026(P), 1997.
- [2] Логунов А.А. и Нгуен Ван Хьеу. // ТМФ. 1969, т.1, с.375.
- [3] Denisov S.P. et al. // Phys. Lett. 1971, v.36B, p.415;  
Amaldi U. et al. // Phys. Lett. 1973, v.43B, p.231.
- [4] Wigner E. // Phys. Rev. 1955, v.98, p.98.
- [5] Froissart M., Goldberger M. and Watson K. // Phys. Rev. 1963, v.131, p.2820.
- [6] Грибов В.Н., Иоффе Б.Л. и Померанчук И.Я. // ЯФ. 1967, т.2, p.768.
- [7] Липатов Л.Н. // ЖЭТФ. 1986, т.90, с.1536.
- [8] Petrov V.A. — In: Proc. of the V-th Blois Workshop on Elastic and Diffractive Scattering (7-12 June 1993, Providence, USA). Ed. C.-I. Tan, H. Fried and K. Kang.

*Рукопись поступила 26 мая 1998 г.*

В.А. Петров.

Дифракция частиц при высоких энергиях.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы  $\text{\LaTeX}$ .

Редактор Н.В.Ежела.

---

Подписано к печати 27.05.98. Формат  $60 \times 84/8$ .

Офсетная печать. Печ.л. 0,5. Уч.-изд.л. 0,39. Тираж 150. Заказ 165.

Индекс 3649. ЛР №020498 17.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.

