объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

Р2-94-463

А.М.Балдин

ПРИНЦИП ОСЛАБЛЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИИ В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Доклад на Международном Боголюбовском симпозиуме «Фундаментальные проблемы теоретической и математической физики», Дубна, 18–21 августа 1994 г.

1994

В этом докладе иллюстрируется фундаментальный вклад Н.Н.Боголюбова в основы физики на примере принципа ослабления корреляции, сформулированного им в статистической механике /1,2/. Боголюбовский принцип лег в основу открытия новых закономерностей в ряде областей физики и, в частности, обсуждаемых ниже закономерностей ядерной физики в широком смысле. В работе Боголюбова /1,2/ говорится: "Подчеркнем, что мы не можем строго доказать принцип ослабления корреляции...Строгое доказательство мы можем провести лишь для ряда простых моделей... Для общего же случая мы можем сослаться либо на интуитивные соображения, либо на аргументы, заимствованные из теории возмущений".

И это признает Боголюбов, будучи крупнейшим специалистом в области математической физики, Боголюбов, сформулировавший аксиоматическую теорию поля, доказавший, исходя из первых принципов, целый ряд постулированных ранее законов в различных областях физики! Он исходит из интуитивных представлений о том, что корреляция между пространственно отдаленными частями групп частиц макроскопической системы практически исчезает. Асимптотическая форма функций Грина как универсальных (не зависящих от специфики системы) линейных форм из средних значений типа

$$F(t_1, x_1, \ldots, t_n, x_n) = < \ldots \Psi^+(t_j, x_j) \ldots, \Psi^+(t_s, x_s) \ldots > \quad ,$$

где $x = (\vec{r}, \sigma)$ - трехмерные координаты и спины частиц, t - моменты времени, рассматривается им в пределе, когда все моменты времени $t_1, \ldots t_n$ фиксированы, а расстояния между точками из различных групп $\{\ldots t_\alpha, x_\alpha \ldots\}$ и $\{\ldots t_\beta, x_\beta \ldots\}$ стремятся к бесконечности. В квантовой теории поля все полевые функции $\Psi(t_i, x_i)$, $\Psi(t_k, x_k)$, как известно, должны точно коммутировать или антикоммутировать, если интервал $-(t_i - t_k)^2 + (\vec{r}_i - \vec{r}_k)^2$ пространственноподобен. При фиксированных t_i, t_k и $|\vec{r}_i - \vec{r}_k| \to \infty$ для нахождения асимптотической формы F можно переставлять полевые функции с функциями из различных групп и тем самым добиться такого положения, когда полевые функции для каждой группы аргументов оказываются вместе в одном комплексе (кластере). Таким образом, получается

$$F(t_1, x_1, \ldots, t_n, x_n) - \eta < U_1(\ldots, t_\alpha, x_\alpha, \ldots) \cdot U_2(\ldots, t_\beta, x_\beta, \ldots) \ldots > \longrightarrow 0, \quad \eta = \pm 1,$$

где $U_1(\ldots, t_\alpha, x_\alpha, \ldots)$ - произведение полевых функций с аргументами только из первой группы, $U_2(\ldots, t_\beta, x_\beta, \ldots)$ - соответствующее произведение с аргументами только из второй группы.

Так как корреляция между динамическими величинами $U_1, U_2, \ldots$ должна ослабевать и практически исчезать для достаточно больших расстояний, асимптотическая форма выражения

$$< U_1(\ldots, t_\alpha, x_\alpha, \ldots) \cdot U_2(\ldots, t_\beta, x_\beta, \ldots) \ldots >$$

распадается на произведения вида

$$< U_1(\ldots t_\alpha, x_\alpha \ldots) > \cdot < U_2(\ldots t_\beta, x_\beta \ldots) \ldots > \cdot \ldots \tag{1}$$

между отдаленными по b_{ik} (или по ρ_{ik}) частями системы частиц практически исчезает. Рассматриваемое пространство относительных скоростей является дополнительным по отношению к обычному пространству относительных расстояний (в квантово-механическом смысле). Малые расстояния $|\vec{r}_i - \vec{r}_k|^2$ соответствуют большим b_{ik}, и наоборот.

Следует подчеркнуть, что свойство убывания распределений (матричных элементов, сечений) с ростом b_{ik} отражает фундаментальное свойство цветовых (кварк-глюонных) взаимодействий - асимптотическую свободу, т.е. исчезновение взаимодействия на асимптотически малых расстояниях или при $b_{ik} \to \infty$. В этом смысле наша гипотеза прямо противоположна принципу ослабления корреляции Боголюбова, хотя и является его обобщением. Совокупность точек в пространстве скоростей разбиваем на группы (кластеры): $\{\ldots, b^{\alpha}_{ik}, \ldots\}, \{\ldots, b^{\beta}_{jl}, \ldots\}$. Под кластером мы понимаем совокупность точек u_k, средний интервал между которыми $\overline{b_{\alpha k}} = -\overline{(V_\alpha - u_k)^2}$ много меньше средних интервалов между центрами кластеров

$\overline{b_{\alpha\beta}} = -\overline{(V_\alpha - V_\beta)^2}$:

$$\overline{b_{\alpha k}} \ll \overline{b_{\alpha\beta}}.$$

Здесь

$$V_\alpha = \frac{\sum u^\alpha_k}{\sqrt{(\sum u^\alpha_k)^2}},\; V_\beta = \frac{\sum u^\beta_j}{\sqrt{(\sum u^\beta_j)^2}} \quad \text{и т.д.}$$

Так как согласно гипотезе корреляция между динамическими величинами, относящимися к различным кластерам, должна исчезать, то при $b_{\alpha\beta} \to \infty$ асимптотическая форма распределений (квадратов матричных элементов, инклюзивных распределений, сечений) распадается на произведения вида

$$W(b_{\alpha k}, b_{\alpha\beta}, b_{\beta k}, \ldots) \longrightarrow W^\alpha \cdot W^\beta \ldots \tag{4}$$

Так же как и в случае рассмотренного выше описания кристаллического состояния множители $W^\alpha, W^\beta, W^\gamma, \ldots$ оказываются не вполне независимыми. Величины $b_{\alpha\beta}, b_{\beta k}, b_{\alpha k}$ являются сторонами треугольника в неевклидовом пространстве. При $b_{\alpha\beta} \to \infty$ в системе $\vec{V}_\alpha = 0$ имеем

$$b_{\alpha\beta} = 2(V^0_\beta - 1) \to \infty \;,$$

$$b_{\alpha k} = 2(u^0_k - 1) \;,$$

$$b_{\beta k} = 2[V^0_\beta u^0_k - (\vec{V}_\beta \cdot \vec{u}) - 1] \to 2V^0_\beta(u^0_k - u^z_k) = b_{\alpha\beta} \cdot x_k \to \infty \;,$$

где $x_k = u^0_k - u^z_k$ - известная переменная светового конуса, $u^z_k = \sqrt{(u^0_k)^2 - 1} \cdot \cos\theta$ - проекция скорости на направление вектора $\vec{V}_\beta$.

Таким образом, в факторизации распределений при $b_{\alpha\beta} \to \infty$ остается зависимость W^α от направления на бесконечно удаленную точку $\vec{V}_\beta$. Эта анизотропия распада кластера в собственной системе носит чисто геометрический характер. При переходе к нерелятивистскому приближению, т.е. от геометрии Лобачевского к геометрии Евклида, зависимость W^α от угла θ вырождается в изотропию. Зависимость W^α от переменной x_k исчезает, т.к. $x_k \to 1$. Это замечание показывает несостоятельность попыток обнаружить квазистационарные объекты, образующиеся в множественном рождении частиц по признаку изотропии распадов в их системе покоя. В релятивистской динамике такие распады всегда анизотропны. Следствия принципа ослабления корреляции для описания множественных процессов необычайно плодотворны и многочисленны. Объединение принципа ослабления корреляции с принципом автомодельности второго рода /7/ позволило предложить метод анализа, с помощью которого были обнаружены простые и универсальные закономерности множественного рождения частиц, установлена их связь с QCD, продемонстрирована наблюдаемость цветных зарядов /6/.

Принцип автомодельности второго рода (встречается также под названием "неполная автомодельность") нашел широкое применение в механике сплошных сред, гидродинамике, теории горения и т.п. /7,8/. С математической точки зрения этот принцип состоит в дополнении принципов теории размерности и инвариантности (автомодельности) определенными свойствами асимптотического поведения решений математической физики, распределений. В рассматриваемом случае при $b_{\alpha\beta} \to \infty$ он формулируется так /9/:

$$W(b_{\alpha k}, b_{\beta k}, b_{\alpha\beta}) \to \frac{1}{b^n_{\alpha\beta}} W^\alpha(b_{\alpha k}, \frac{b_{\beta k}}{b_{\alpha\beta}}) \;. \tag{5}$$

Как показано выше,

$$\frac{b_{\beta k}}{b_{\alpha\beta}} \to x_k \;, \text{ где}$$

x_k - переменная светового фронта. Закон (5) справедлив с определенной точностью и в определенных пределах изменения $b_{\alpha\beta}$. В механике сплошных сред он носит название "промежуточная асимптотика". Величина $W^\alpha = b^n_{\alpha\beta} \cdot W$ при фиксированных $b_{\alpha k}$ и x_k (параметрах подобия) остается неизменной при изменении всех остальных параметров, включая $b_{\alpha\beta}$, подобной самой себе (автомодельной).

Автомодельность, введенная в физику частиц Матвеевым, Мурадяном и Тавхелидзе /10/, подразумевает инвариантность по отношению к преобразованию импульсного пространства $P_i \to \lambda P_i$. Как видно из формулы (5), рассматриваемые нами законы подобия существенно шире подобия, основанного на простой масштабной инвариантности.

Итак, используя теорию подобия, принцип ослабления корреляций для двух кластеров α и β в адронной физике формулируется в виде следующей закономерности:

$$W(b_{\alpha\beta}, b_{\alpha k}, b_{\beta j}, b_{\beta k}, b_{\alpha j}) = \frac{1}{b^n_{\alpha\beta}} W^\alpha(b_{\alpha k}, \frac{b_{\beta k}}{b_{\alpha\beta}}) \cdot W^\beta(b_{\beta j}, \frac{b_{\alpha j}}{b_{\alpha\beta}}) \;. \tag{6}$$

Аргументы W^α и W^β содержат зависимость от проекций скоростей на ось, соединяющую центры кластеров:

$$V_\alpha = \frac{\sum u_k}{\sqrt{(\sum u_k)^2}} \quad , \quad V_\beta = \frac{\sum u_j}{\sqrt{(\sum u_j)^2}} \quad .$$

Вигнер /11/ неоднократно высказывал интересные методологические идеи о соотношении между тремя категориями, играющими фундаментальную роль во всех естественных науках: явлениями, служащими сырьем для второй категории - законов природы и принципами симметрии (третьей категорией). Он особенно подчеркивал, что для принципов симметрии сырьем служат законы природы. Принципы симметрии наделяют структурой законы природы. Исходя из принципов, можно вывести новые законы природы дедуктивно, а не только на основе наблюдений над физическими объектами. Принципы симметрии в этой связи иногда называют сверхзаконами природы, фундаментом науки. Математическим выражением концепции симметрии является, как известно, концепция группы. Связь принципа ослабления корреляций с группой Лоренца очевидна из вышеизложенного. Законы подобия (автомодельности) можно изложить на языке представлений мультипликативной группы /8/. Таким образом, полученная на основе симметрийных соображений формула (6) и аналогичные ей определяют структуру законов множественного рождения частиц, сильно ограничивая модельные представления. Они позволяют упорядочить огромный экспериментальный материал по множественным адронным процессам, сведя его к простым параметризациям универсальных релятивистски-инвариантных функций W^α, показать избыточность ряда постановок задач физики высоких энергий, оптимизировать условия дорогостоящих экспериментов на крупнейших ускорителях. Особое значение имеет прямая экспериментальная проверка принципа ослабления корреляций.

При анализе экспериментального материала по множественному рождению частиц в разных реакциях на разных ускорителях /6/ обнаружен универсальный характер распределений W^α. Универсальные пионные кластеры W^α в области $b_{\alpha\beta} \geq 50$ оказались интенсивно изучаемыми струями. Асимптотический характер промежуточной асимптотики был проверен в области $20 \leq b_{\alpha\beta} \leq 10^5$. Параметр n измеренной зависимости $\frac{dN}{db_{\alpha\beta}} = \frac{A}{b^n_{\alpha\beta}}$ оказался универсальным и равным $n \approx 3$ с точностью, лучшей 10%. Барионные кластеры (исследовались в основном протонные кластеры) тоже являются универсальными релятивистски-инвариантными объектами, расположенными в малой окрестности точек u_I и u_{II}. Это находится в хорошем согласии с известной гипотезой предельной фрагментации Ч.Н.Янга и его коллег /12/, которая является частным случаем закона (6) при $\alpha = I$, $\beta = II$ и $n = 0$.

Проверка гипотезы предельной фрагментации была проведена В.С.Ставинским и его коллегами /13/ в связи с открытием кумулятивного эффекта. Особое значение приобрело обнаружение раннего выхода на асимптотический режим в релятивистских ядерных столкновениях при $b_{II} \geq 5$, что соответствует энергии релятивистских ядер 3,5 А ГэВ. Переходный режим и ранний выход на асимптотику был изучен группой Ли Шредера /14/ (Беркли, США). Эти результаты имели определяющее значение для окончательного выбора параметров нуклотрона, для разработки программы исследований в области релятивистской ядерной физики и определения пределов применимости протон-нейтронной модели ядра. Предсказательная сила закономерностей типа (6) оказалась очень большой. Особый интерес представляет изучение кумулятивных струй (выбивание из ядер цветных зарядов).

Из экспериментальных данных, полученных на установке DELPHI, была выделена и измерена 3- глюонная вершина /16/ (самодействие глюонов) при изучении четырехструйных событий $e^+e^- \to q_\alpha \bar{q}_\beta g_\gamma g_\delta$.Тем самым удалось экспериментально проверить групповую структуру хромодинамики: $SU_c(3)$, определить отношение N_c/N_A числа цветных переменных кварка N_c к числу цветных переменных глюона N_A : 3/8. Дальнейшее изучение таких реакций позволит провести раздельное изучение фрагментационных функций кварков $W^{\alpha,\beta}(b_k x_k)$ и глюонов $W^{\gamma,\delta}$. Они должны отличаться от универсальных распределений $W^\alpha(b_k x_k)$, найденных ранее без разделения струй на кварковые и глюонные /6/. Асимптотический характер закономерностей (6) позволяет утверждать, что планируемые в ЦЕРН эксперименты по изучению столкновений ядер свинца при энергии 200 А ГэВ не оправдают многих надежд и гипотез, изложенных, например, в /15/.

Особо актуальное значение приобретает в последние годы изучение переходного режима: нуклонная материя - кварк-глюонная материя. Эта проблема, а также перечисленные выше, широко обсуждаются на крупных международных конференциях и особенно на регулярных международных семинарах "Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика", проводимых в Дубне. Эти направления экспериментальных исследований были активно поддержаны Н.Н.Боголюбовым. Он называл их исследованием цветных степеней свободы в ядрах. Богатейшая интуиция Боголюбова-физика сыграла очень важную роль в становлении новых областей ядерной физики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bogolubov N.N. Physica, v.265 (1960) p.1.
2. Боголюбов Н.Н. Сообщения ОИЯИ Д-781, Дубна, 1958.
3. Dirac P.A.M. Rev.Mod.Phys., v.21, No.3 (1949) 393.
4. Соловьев В.Г. Теория сложных ядер. М.: Наука (1971) с.214.
5. Baldin A.M. Nucl. Phys. A447 (1985) p.203
6. Baldin A.M., Didenko L.A. Fortschr.Phys., v.38 (1994) p.261-332.
7. Баренблат Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Л.: Гидрометеоиздат (1982) с.16, 93.
8. Birkhoff G. Hydrodynamics. A study in logic, fact and similitude, Princeton, New Jersey, Princeton University Press (1960).

9. Baldin A.M., Baldin A.A. JINR Rapid Communications 17-86, Dubna (1986), p.19
10. Матвеев В.А., Мурадян Р.М., Тавхелидзе А.Н. Препринт ОИЯИ Р2-4578, Дубна, 1969; ТМФ, т.15 (1973) с.332. Lett.Nuov.Cim., v.5 (1972) p.907.
11. Wigner E.P. Symmetries and Reflections. Indiana University Press, Bloomington-London (1970).
12. Benecke J. et al., Phys.Rev., v.188 (1969) p.2159.
13. Ставинский В.С. ЭЧАЯ, т.10 (1979) с.949.
14. Shroeder L.S. et al. Phys.Rev.Lett., v.43 (1979) p.1787.
15. Gutbrod H. Proc. Intern. Europhysics Conference on High Energy Physics, Marseille, France (1993) p.761.
16. DELPHI Collaboration Z.Phys.C 59 (1993) p.357-368.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 декабря 1994 года.