

## Памяти Льва Николаевича Липатова

PACS number: 01.60.+q

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.11.038249>

4 сентября 2017 г. на 78-м году жизни скоропостижно скончался выдающийся физик-теоретик, действительный член Российской академии наук, руководитель Отделения теоретической физики Петербургского института ядерной физики, Лев Николаевич Липатов. Российская наука потеряла одного из своих ярчайших представителей.

Лев Николаевич Липатов широко известен мировой научной общественности как один из создателей современной теоретической физики высоких энергий. Значение его работ далеко выходит за рамки теоретического описания конкретных процессов; они являются основой для применения пертурбативной квантовой теории поля к взаимодействиям элементарных частиц при высоких энергиях. Его исследования имеют первостепенное значение не только для экспериментов на современных коллайдерах, но и для понимания эволюции Вселенной. Их воздействие на мировую науку подтверждается громадным числом связанных с ними статей, публикуемых в научных журналах. Уже сейчас запланирован ряд международных конференций, посвящённых памяти Льва Николаевича.

Л.Н. Липатов родился в Ленинграде 2 мая 1940 г. К счастью, ужасы блокады его практически не задели, так как в конце августа 1941 г. он был эвакуирован в Тамбовскую область, откуда вернулся в Ленинград в 1944 г. В 1962 г. он окончил физический факультет Ленинградского государственного университета, а в 1963 г. поступил в аспирантуру возглавляемого В.Н. Грибовым теоретического отдела Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе АН СССР.

Конец 1950-х и начало 1960-х годов были временем неверия в применимость квантовой теории поля к описанию сильных взаимодействий и поисков альтернативных подходов. Популярной была теория полюсов Редже, которая большей частью усилиями В.Н. Грибова превращалась в релятивистскую теорию комплексных угловых моментов — теорию Редже–Грибова. Однако квантовая теория поля не была отброшена группой Грибова, а активно использовалась для сверки с идеями реджезации и для построения реджеонной диаграммной техники. К этому направлению относятся первые работы Л.Н. Липатова, выполненные совместно с В.Н. Грибовым, В.Г. Горшковым и Г.В. Фроловым в 1966–1970 гг. В этих работах, ставших классическими, были найдены высокоэнергетические асимптотики процессов рассеяния в квантовой электродинамике в лидирующих логарифмических приближениях. В амплитудах процессов с падающими с энергией сечениями были обнаружены отличные от известных (так называемых судаковских) дважды-логарифмы и разработана методика их суммирования. Позднее Лев Николаевич кардинально усовершенствовал эту методику с помощью открытого им инфракрасного уравнения эволюции. Для процессов с убывающими сечениями были просуммированы главные одно-логарифмические вклады и найдена асимптотика сечений этих процессов при большой энергии. На языке теории Редже–Грибова был найден интереснейший поперерон (положение крайне правой особенности в плоскости комплексных угловых моментов) в квантовой электродинамике и было показано, что поперерон является неподвижной точкой ветвления.



Лев Николаевич Липатов  
(02.05.1940 – 04.09.2017)

Уже при выполнении этих работ Лев Николаевич показал поразительную способность находить элегантные и математически строгие решения чрезвычайно трудных задач, пробиться там, где это считалось невозможным. Несомненно, это было высоко оценено В.Н. Грибовым, который стал относиться к нему как к равному.

Всю свою творческую жизнь Лев Николаевич находился на передовых рубежах физики высоких энергий, и эти рубежи продвигались вперёд во многом благодаря его усилиям. В 1971–1972 годах, вскоре после экспериментального обнаружения Бьеркеновского скейлинга в глубоко неупругом рассеянии электронов на протонах, в работах В.Н. Грибова и Л.Н. Липатова путём суммирования главных логарифмических вкладов в сечения глубоко неупругого рассеяния и инклюзивной аннигиляции в двух моделях теории поля было продемонстрировано нарушение скейлинга и получено знаменитое "соотношение взаимности", связывающее структурные функции двух процессов. В этих работах было показано, что в квантовой теории поля партонные распределения не являются постоянными, как в наивных партонных моделях, обеспечивающих бьеркеновский скейлинг, а логарифмически зависят от переданного

импульса. Чуть позже (в 1974 году) Лев Николаевич переформулировал полученные результаты на партонном языке и вывел уравнения эволюции партонных распределений с переданным импульсом в перенормируемых теориях поля. По существу, уравнения представляют собой уравнения ренормгруппы и имеют универсальный характер; от вида теории зависят только ядра уравнений. В квантовой хромодинамике эти ядра были посчитаны в 1977 г. и уравнения носят теперь название DGLAP. Полученные с их помощью партонные распределения являются неотъемлемой частью теоретического описания процессов с участием адронов высокой энергии. Позже (в 1985 году) Лев Николаевич с соавторами вывел более общие уравнения эволюции для квазипартонных операторов, дающие основу для описания поляризационных явлений и вычисления степенных поправок к сечениям жёстких адронных процессов.

Сразу после открытия асимптотической свободы в неабелевых калибровочных теориях Лев Николаевич приступил к исследованию высокоэнергетических асимптотик в таких теориях и обнаружил свойство реджезации векторного бозона. На этой основе им (с соавторами) в 1975 г. было выведено в главном логарифмическом приближении уравнение эволюции с энергией для амплитуд в теориях со спонтанным нарушением симметрии, дающим массу всем калибровочным бозонам. В 1978 г. Львом Николаевичем с учеником было показано, что это уравнение может быть использовано в квантовой хромодинамике, где оно получило широкую известность как уравнение BFKL. Это уравнение определяет асимптотику амплитуд процессов с обменом двумя реджезованными глюонами в любом цветовом состоянии. В BFKL теории поперон, определяющий асимптотику амплитуд наблюдаемых процессов, является связанным состоянием двух реджезованных глюонов в бесцветном состоянии. В 1998 г., после многолетней работы Льва Николаевича с соавторами, уравнение BFKL было получено в следующем за главным логарифмическом приближении. В настоящее время BFKL теория является одним из основных инструментов теоретического описания экспериментальных данных, полученных на современных ускорителях.

Впечатляющий пример виртуозной техники Лев Николаевич показал при вычислении коэффициентов высоких порядков рядов теории возмущений в квантовой теории поля, используя для вычисления решения классических уравнений поля и квантовые флуктуации вокруг них. О высочайшем уровне мастерства говорит тот факт, что хотя аргументы в пользу асимптотического характера ряда были выдвинуты ещё в 1950-х годах, до работ Льва Николаевича не существовало даже надёжных оценок этих коэффициентов. Развитый им метод вычислений сразу был высоко оценен специалистами и стал классическим. Он широко применяется не только в физике элементарных частиц, но и в физике твёрдого тела, и в статистической физике. Другими примерами непревзойдённого мастерства Льва Николаевича является доказательство конформной инвариантности в пространстве прицельных параметров ядра уравнения BFKL для бесцветных состояний (1986), голоморфной сепарабельности гамильтониана парного взаимодействия реджезованных глюонов в пределе большого числа цветов (1990), эквивалентности гамильтониана взаимодействия  $n$  реджеонов и гамильтониана спиновой модели Гейзенберга, в которой спинами являются генераторы группы Мёбиуса, и полной интегрируемости реджеонной динамики в многоцветной квантовой хромодинамике (1994).

Возникшее ещё во время обучения увлечение проблемами реджезации и взаимодействия реджеонов Лев Николаевич пронёс через всю жизнь. В 1982 году он показал, что гравитон, так же как и глюон, лежит на реджевской траек-

тории, а в 2007 г. исследовал реджезацию в электрослабом секторе Стандартной модели. На протяжении ряда лет он занимался построением реджеонной теории для квантовой хромодинамики и квантовой теории гравитации. В 1995 году им было построено основанное на реджезованных глюонах эффективное действие для высокоэнергетических процессов в квантовой хромодинамике; в 2001 г. в него были включены реджезованные кварки; в 2011 г. построено эффективное действие в гравитации. Развитая (совместно с соавторами) на этой основе диаграммная техника с успехом применяется в настоящее время как в теории, так и в феноменологии.

Ряд замечательных результатов Лев Николаевич получил в максимально расширенной суперсимметричной теории Янга–Миллса. В частности, им с соавторами была обнаружена интегрируемость уравнений для аномальных размерностей (1997), вычислены двухпетлевые поправки к уравнению BFKL в этой теории (2000), вычислены четырёхпетлевые аномальные размерности (2004–2007), обнаружена полная интегрируемость амплитуд рассеяния (2009), показана неполнота BDS-анзаца и вычислена поправочная функция к нему (2009–2012). Предложенный им принцип максимальной трансцендентальности (2003), появившийся как гениальная догадка, сейчас получил множество подтверждений и широко используется в теоретических изысканиях. Гипотеза о дуальности померона и гравитона выглядит всё более и более обоснованной.

Результаты Л.Н. Липатова широко известны в мире. Созданная им научная школа объединила теоретиков многих стран, включая Россию, Германию, Францию, США, Испанию, Израиль, Польшу и другие страны. Он удостоен множества научных наград, среди которых премия А. фон Гумбольдта (1995), премия И.Я. Померанчука (2001), премия Марии Кюри (2006) и премия Европейского физического общества в области физики частиц и физики высоких энергий (2015). Значение результатов, полученных Л.Н. Липатовым, подтверждается огромным числом (более 26000) ссылок, которые собрали его работы.

Помимо исследовательской работы, Лев Николаевич вёл активную педагогическую деятельность в Санкт-Петербургском государственном университете. Несмотря на постоянную глубокую погружённость в науку, на отнимающие время административные обязанности, он не перекладывал чтение лекций на своих учеников и сотрудников и даже находил время для создания оригинальных учебных пособий. Кроме этого, он участвовал в организации множества школ и конференций как в России, так и за рубежом. Особенно широко известны организованные им Зимние Школы по теоретической физике и конференции "Структура адронов и квантовая хромодинамика".

Лев Николаевич бесконечно любил науку. Он был так погружён в неё, что не замечал окружающих жизненных проблем. Наука занимала почти все его мысли. Он был готов говорить о ней в любое время и в любом состоянии. Страсть к науке совмещалась в нём с прекрасными человеческими качествами. Он был очень добрым человеком. В круг его общения входили люди разного возраста из разных социальных слоёв, и со всеми он был ровен, не было в нём и намёка не только на какую-либо спесь, но и просто на осознание своей значимости в этом мире и своего положения.

Светлая память о Льве Николаевиче навсегда сохранится в наших сердцах, в его выдающихся достижениях, в работах его учеников и последователей.

*А.А. Белавин, М.И. Высоцкий, С.С. Герштейн,  
В.И. Захаров, Б.Л. Иоффе, Д.И. Казаков,  
В.Т. Ким, В.А. Матвеев, А.М. Поляков  
В.А. Рубаков, А.А. Славнов, В.С. Фадин*

## Монография

B.L. Ioffe, V.S.Fadin, L.N.Lipatov, LN., Quantum chromodynamics: Perturbative and nonperturbative aspects. Cambridge University Press, 2010

## Обзоры

1. L.N. Lipatov, Pomeron in Quantum Chromodynamics. In: Advanced Series on Directions in High Energy Physics. Perturbative QCD (Ed. A.H. Mueller), World Scientific, 5, 411-489, 1989
2. L.N. Lipatov, Small-x physics in perturbative QCD. PHYSICS REPORTS-REVIEW SECTION OF PHYSICS LETTERS 286(3), 131-198 (1997)
3. L.N Lipatov, Integrability of the Pomeron interactions in the multi-colour QCD. In: I. YA POMERANCHUK AND PHYSICS AT THE TURN OF THE CENTURY (Eds. A. Berkov, NNarozhny, L. Okun), WorldScientific, 124-157, 2003
4. Л.Н. Липатов, Свойства интегрируемости в квантовой хромодинамике высоких энергий при большом числе цветовых УФН, 174 337–352 (2004) [L.N. Lipatov, Integrability properties of high energy dynamics in the multi-colour QCD. Physics-Uspekhi, 47 325–339 (2004)]

## Высокоцитируемые статьи

1. Gorshkov, VG; Gribov, VN; Lipatov, LN; Frolov, GV.  
Electron-positron backward scattering at high energies  
Yadernaya Fizika 6(2), 361 (1967) [SOVIET JOURNAL OF NUCLEAR PHYSICS-USSR 6(2), 262 (1968)]
2. Gorshkov, VG; Gribov, VN; Lipatov, LN; Frolov, GV.  
Doubly logarithmic asymptotic behavior in quantum electrodynamics  
Yadernaya Fizika 6(1), 129 (1967) [SOVIET JOURNAL OF NUCLEAR PHYSICS-USSR 6(1), 95 (1968)]
3. Frolov, GV; Gribov, VN; Lipatov, LN.  
On vacuum pole in quantum electrodynamics  
PHYSICS LETTERS B B 31(1), 34 (1970)
4. Lipatov, LN; Frolov, GV.  
Some processes in quantum electrodynamics at high energies  
Yadernaya Fizika 13(3), 588 (1971) [SOVIET JOURNAL OF NUCLEAR PHYSICS-USSR 13(3), 333 (1971)]
5. Gribov, VN; Lipatov, LN; Frolov, GV.  
Leading singularity in j plane in quantum electrodynamics  
SOVIET JOURNAL OF NUCLEAR PHYSICS-USSR 12(5), 543 (1971)
6. Gribov, VN; Lipatov, LN.  
Deep inelastic electron scattering in perturbation theory  
PHYSICS LETTERS B B 37(1), 78 (1971)
7. Gribov, VN; Lipatov, LN.  
Deep inelastic ep scattering in perturbation-theory  
Yadernaya Fizika 15(4), 781 (1972) [SOVIET JOURNAL OF NUCLEAR PHYSICS-USSR 15(4), 438 (1972)]
8. Gribov, VN; Lipatov, LN.  
E+E--pair annihilation and deep inelastic ep scattering in perturbation-theory  
Yadernaya Fizika 15(6), 1218 (1972) [SOVIET JOURNAL OF NUCLEAR PHYSICS-USSR 15(6), 675 (1972)]
9. Lipatov, LN.  
Parton model and perturbation-theory  
Yadernaya Fizika 20(1), 181 (1974) [SOVIET JOURNAL OF NUCLEAR PHYSICS-USSR 20(1), 94 (1975)]

10. Fadin, VS; Kuraev, EA; Lipatov, LN.  
Pomeranchuk singularity in asymptotically free theories  
PHYSICS LETTERS B 60(1), 50 (1975)
11. Lipatov, LN.  
Reggeization of vector-meson and vacuum singularity in nonabelian gauge theories  
Yadernaya Fizika 23(3), 642 (1976) [SOVIET JOURNAL OF NUCLEAR PHYSICS-USSR 23(3), 338 (1976)]
12. LIPATOV, LN.  
Calculation of gell-mann-low function in scalar theories with strong nonlinearity  
JETP LETTERS 24(3), 157 (1976)
13. Kurayev, EA; Lipatov, LN; Fadin, VS.  
Multi-reggeon processes in yang-mills theory  
ZHURNAL EKSPERIMENTALNOI I TEORETICHESKOI FIZIKI 71(9), 840 (1976) [Sov. Phys. JETP 44, 443 (1976)]
14. Lipatov, LN.  
Divergence of perturbation-theory series and quasiclassical theory  
ZHURNAL EKSPERIMENTALNOI I TEORETICHESKOI FIZIKI 72(2), 411 (1977)
15. Lipatov, LN.  
Divergence of perturbation-theory series and pseudoparticles  
Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki, Pis'ma v Redaktsiyu 25(2), 116 (1977) [JETP LETTERS 25(2), 104 (1977)]
16. Kurayev, EA; Lipatov, LN; Fadin, VS.  
Pomeranchuk singularity in non-abelian gauge theories  
ZHURNAL EKSPERIMENTALNOI I TEORETICHESKOI FIZIKI 72(2), 377 (1977)
17. Balitskii, YY; Lipatov, LN.  
Pomeranchuk singularity in quantum chromodynamics  
Yadernaya Fizika 28(6), 1597 (1978) [SOVIET JOURNAL OF NUCLEAR PHYSICS-USSR 28(6), 822 (1978)]
18. Balitskii, YY; Lipatov, LN.  
Calculation of the meson-meson interaction cross-section in quantum chromodynamics  
Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki 30(6), 383 (1979) [JETP LETTERS 30(6), 355 (1979)]
19. Lipatov, LN.  
Graviton reggeization  
PHYSICS LETTERS B 116(6), 411-413 (1982)
20. Kirschner, R; Lipatov, LN.  
Double logarithmic asymptotics and regge singularities of quark amplitudes with flavor exchange  
NUCLEAR PHYSICS B 213(1), 122-148 (1983)
21. Bukhvostov, AP; Kurayev, EA; Lipatov, LN.  
Deep-inelastic scattering by a polarized target in quantum chromodynamics  
Soviet Physics - JETP 60(1), 22 (1984) [ZHURNAL EKSPERIMENTALNOI I TEORETICHESKOI FIZIKI 87(1), 37-55 (1984)]
22. Bukhvostov, AP; Frolov, GV; Lipatov, LN; Kuraev, EA.  
Evolution-equations for quasi-partonic operators  
NUCLEAR PHYSICS B 258(3-4), 601-646 (1985)
23. Lipatov, LN.  
Bare pomeron in quantum chromodynamics

- ZHURNAL EKSPERIMENTALNOI I TEORETICHESKOI FIZIKI 90(5), 1536-1552 (1986) [Soviet Physics - JETP 63(5), 904 (1986)]
24. Lipatov, LN; Fadin, VS.  
Gluon production in a quasimulti-regge kinematics  
JETP LETTERS 49(6), 352-356 (1989)
  25. Lipatov, LN; Fadin, VS.  
High-energy gluon production in the quasi-multi-regge kinematics  
SOVIET JOURNAL OF NUCLEAR PHYSICS-USSR 50(4), 712-718 (1989)
  26. LIPATOV, LN.  
Pomeron and odderon in qcd and a 2-dimensional conformal field-theory  
PHYSICS LETTERS B 251(2), 284-287 (1990)
  27. LIPATOV, LN.  
High-energy scattering in qcd and in quantum-gravity and 2-dimensional field-theories  
NUCLEAR PHYSICS B 365(3), 614-632 (1991)
  28. Lipatov, LN.  
High-energy asymptotics of multicolor qcd and 2-dimensional conformal field-theories  
PHYSICS LETTERS B 309(3-4), 394-396 (1993)
  29. Fadin, VS; Lipatov, LN.  
Radiative-corrections to qcd scattering-amplitudes in a multi-regge kinematics  
NUCLEAR PHYSICS B 406(1-2), 259-292 (1993)
  30. Lipatov, LN.  
Asymptotic-behavior of multicolor qcd at high-energies in connection with exactly solvable spin models  
JETP LETTERS 59(9), 596-599 (1994)
  31. Kirschner, R; Lipatov, LN; Szymanowski, L.  
Effective action for multi-regge processes in qcd  
NUCLEAR PHYSICS B 425(3), 579-594 (1994)
  32. LIPATOV, LN.  
GAUGE-INVARIANT EFFECTIVE ACTION FOR HIGH-ENERGY PROCESSES IN QCD  
NUCLEAR PHYSICS B 452(1-2), 369-397 (1995)
  33. Bartels, J; Lipatov, LN; Wusthoff, M.  
Conformal invariance of the transition vertex 2->4 gluons  
NUCLEAR PHYSICS B 464(1-2), 298-316 (1996)
  34. Fadin, VS; Lipatov, LN.  
Next-to-leading corrections to the BFKL equation from gluon and quark production  
NUCLEAR PHYSICS B 477(3), 767-805 (1996)
  35. Arbuzov, AB; Fadin, VS; Kuraev, EA; Lipatov, LN; Merenkov, NP; Trentadue, L.  
Small-angle electron-positron scattering with a per mille accuracy  
NUCLEAR PHYSICS B 485(1-2), 457-499 (1997)
  36. Fadin, VS; Kotsky, MI; Lipatov, LN.  
One-loop correction to the BFKL kernel from two gluon production  
PHYSICS LETTERS B 415(1), 97-103 (1997)
  37. Fadin, VS; Lipatov, LN.  
BFKL pomeron in the next-to-leading approximation  
PHYSICS LETTERS B 429(1-2), 127-134 (1998)

38. Lipatov, LN.  
Duality symmetry of Reggeon interactions in multicolour QCD  
NUCLEAR PHYSICS B 548(1-3), 328-362 (1999)
39. Brodsky, SJ; Fadin, VS; Kim, VT; Lipatov, LN; Pivovarov, GB.  
The QCD Pomeron with optimal renormalization  
JETP LETTERS 70(3), 155-160 (1999)
40. Bartels, J; Lipatov, LN; Vacca, GP.  
A new odderon solution in perturbative QCD  
PHYSICS LETTERS B 477(1-3), 178-186 (2000)
41. Fadin, VS; Lipatov, LN; Martin, AD; Melles, M.  
Resummation of double logarithms in electroweak high energy processes  
PHYSICAL REVIEW D 61(9), - (2000)
42. Kotikov, AV; Lipatov, LN.  
NLO corrections to the BFKL equation in QCD and in supersymmetric gauge theories  
NUCLEAR PHYSICS B 582(1-3), 19-43 (2000)
43. Lipatov, LN; Vyazovsky, MI.  
Quasi-multi-Regge processes with a quark exchange in the t-channel  
NUCLEAR PHYSICS B 597(1-3), 399-409 (2001)
44. de Vega, HJ; Lipatov, LN.  
Interaction of Reggeized gluons in the Baxter-Sklyanin representation  
PHYSICAL REVIEW D 64(11), - (2001)
45. Brodsky, SJ; Fadin, VS; Kim, VT; Lipatov, LN; Pivovarov, GB.  
High-energy QCD asymptotic behavior of photon-photon collisions  
JETP LETTERS 76(5), 249-252 (2002)
46. de Vega, HJ; Lipatov, LN.  
Exact resolution of the Baxter equation for Reggeized gluon interactions  
PHYSICAL REVIEW D 66(7), - (2002)
47. Kotikov, AV; Lipatov, LN; Velizhanin, VN.  
Anomalous dimensions of Wilson operators in N=4 SYM theory  
PHYSICS LETTERS B 557(1-2), 114-120 (2003)
48. Kotikov, AV; Lipatov, LN.  
DGLAP and BFKL equations in the N=4 supersymmetric gauge theory  
NUCLEAR PHYSICS B 661(1-2), 19-61 (2003)
49. Kotikov, AV; Lipatov, LN.  
DGLAP and BFKL equations in the N = 4 supersymmetric gauge theory (vol 661, pg 19, 2003)  
NUCLEAR PHYSICS B 685, 405-407 (2004)
50. Kotikov, A; Lipatov, LN; Onishchenko, AI; Velizhanin, VN.  
Three-loop universal anomalous dimension of the Wilson operators in N=4 SUSY Yang-Mills model  
PHYSICS LETTERS B 595, 521-529 (2004)
51. Antonov, EN; Cherednikov, IO; Kuraev, EA; Lipatov, LN.  
Feynman rules for effective Regge action  
NUCLEAR PHYSICS B 721, 111-135 (2005)
52. Kotikov, AV; Lipatov, LN.  
On the highest transcendentality in N=4 SUSY  
NUCLEAR PHYSICS B 769(3), 217-255 (2007)

53. Kotikov, AV; Lipatov, LN; Rej, A; Staudacher, M; Velizhanin, VN.  
Dressing and wrapping  
JOURNAL OF STATISTICAL MECHANICS-THEORY AND EXPERIMENT , - (2007)
54. Lipatov, LN.  
Integrability of scattering amplitudes in N=4 SUSY  
JOURNAL OF PHYSICS A-MATHEMATICAL AND THEORETICAL 42(30), - (2009)
55. Bartels, J; Lipatov, LN; Vera, AS.  
BFKL Pomeron, Reggeized gluons, and Bern-Dixon-Smirnov amplitudes  
PHYSICAL REVIEW D 80(4), - (2009)
56. Bartels, J; Lipatov, LN; Vera, AS.  
N=4 supersymmetric Yang-Mills scattering amplitudes at high energies: the Regge cut contribution  
EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C 65(3-4), 587-605 (2010)
57. Lipatov, LN; Prygarin, A.  
BFKL approach and six-particle maximally helicity violating amplitude in N=4 super Yang-Mills theory  
PHYSICAL REVIEW D 83(12), - (2011)
58. Fadin, VS; Lipatov, LN.  
BFKL equation for the adjoint representation of the gauge group in the next-to-leading approximation at N=4 SUSY  
PHYSICS LETTERS B 706(4-5), 470-476 (2012)