



ВКЛАД Ю.Л. КЛИМОНТОВИЧА В КИНЕТИЧЕСКУЮ ТЕОРИЮ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

М. Бонитц, В. Эбелинг, Ю.М. Романовский

Дано краткое описание жизни и научной деятельности Ю.Л. Климонтовича и обзор его основных научных работ. Особое внимание уделено работам по физике неидеальной плазмы.

В конце концов мы достигли конечной точки нашего долгого пути. Несомненно, не все на этом долгом пути было достаточно гладко.

Ю.Л. Климонтович, «Статистическая физика», 1982

Биография Ю.Л. Климонтовича

Юрий Львович Климонтович родился 28 сентября 1924 года в Москве. Его мать, Наталья Владимировна Владыкина, была родом из известной знатной русской семьи Владыкиных. Семья была татарского происхождения и служила при царе Иване Грозном. В то время они получили в собственность большие земельные владения и стали состоятельными людьми. Отец Юрия Львовича также был из знатной семьи (дворянской уже во втором поколении). Он был арестован при Сталинском режиме в 1931 году и спустя две недели расстрелян. Только через 62 года семья получила официальное сообщение об этом. Вскоре после ареста отца мать Юрия Львовича умерла. Юрию Львовичу и его двум братьям пришлось жить в семье его тети, которая была очень бедной. Чтобы поддержать семью, Юрий Львович работал - перевозил багаж на тележке от железнодорожных станций. Еще школьником он заболел туберкулезом и перенес очень тяжелую операцию. По этой причине Юрий Львович был освобожден от службы в армии и смог поступить в Инженерный институт. После войны, в 1946 году Юрий Львович перешел на физический факультет Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова. Руководителем его дипломной работы по «радиационному тренингу» [1] был профессор В.С. Фурсов. Юрий Львович как очень активный молодой человек хотел стать аспирантом. Однако ему было отказано

* Перевод статьи © M. Bonitz, W. Ebeling and Yu. Romanovsky. Contributions of Yuri L. Klimontovich to the kinetic theory of nonideal plasmas. Contrib. Plasma Phys. **43**, No.5-6, 247-251 (2003).

администрацией университета, так как его отец был репрессирован. Вскоре после отказа в возможности обучения в аспирантуре, а также и в поступлении на работу в Академию наук, по счастливой случайности Юрий встретился с профессором Н.Н. Боголюбовым, который заинтересовался насчет его дальнейших планов. Будучи очень высокого мнения о Юрии Львовиче, Н.Н. Боголюбов лично взял его к себе в аспирантуру, проигнорировав официальное решение. В 1951 году Юрий Львович защитил кандидатскую диссертацию. Впоследствии он подчеркивал, что без поддержки В.С. Фурсова (который позже долгое время был деканом физического факультета) и академика Н.Н. Боголюбова он никогда не имел бы возможность сделать научную карьеру. Юрий Львович всегда был самого высокого мнения о своих учителях.

Приступив к занятию физикой с ряда проблем, предложенных его учителями, Юрий Львович продолжал работать (совершенно независимо) над созданием новой теории плазмы, в основе которой лежал его собственный метод «вторичного квантования в фазовом пространстве» [3]. Среди его соавторов в этот период были В.П. Силин (работа по спектрам возбуждения [2]) и В. Эбелинг (гидродинамическое приближение). С 1952 года Ю.Л. Климонтович работал доцентом в Авиационном технологическом институте, а с 1955 года - в Московском государственном университете, на кафедре профессора С.П. Стрелкова. В то время на кафедре сформировалась великолепная группа молодых ученых, в которую входили Р. Стратонович, В. Шмальгаузен, П. Ланда и др. Все эти ученые внесли значительный вклад в различные разделы физики и математики. При поддержке Н.Н. Боголюбова Юрий Львович защитил докторскую диссертацию в Математическом институте им. В.А. Стеклова и в 1965 году получил должность полного профессора в МГУ.

Ю.Л. Климонтович проработал в МГУ 40 лет. Он был прекрасным преподавателем и никогда не пользовался записями при чтении лекций. Будучи сначала доцентом, а затем профессором, Юрий Львович вел курс статистической физики на механико-математическом факультете и факультете повышения квалификации. У него обучалось большое количество студентов и кандидатов наук, среди последних - Анищенко, Асташкина, Белый, Чечкин, Четвериков, Емельянов, Кучаренко, Слинко и др. Среди его зарубежных учеников - Bonitz, Bornath, Ebeling, Engel-Herbert, Handrich, Kraeft, Kremp, Leven, Schlanges, Ulbricht и др.

Работа Ю.Л. Климонтовича была оценена многими институтами и университетами. Он был приглашенным профессором университетов Берлина, Брюсселя, Комо, Грайфсвальда, Парижа, Рима и Ростoka. За научные достижения Юрий Львович был награжден Почетной медалью и званием Почетного доктора Ростокского университета (1986, 1990), Государственной премией РФ (1991), премией Фонда им. А. фон Гумбольдта (Германия, 1994), многократными стипендиями Фонда Сороса (1995-1998), Золотой медалью им. П.Л. Капицы Российской академии естественных наук (1997).

27 ноября 2002 года Ю.Л. Климонтович ушел из жизни, вскоре после серьезной операции. В его семье остались жена, Светлана Иосифовна Маевская*, сын Николай, дочь Катя и внук Ваня.

Ранние работы и первая книга по неравновесной плазме 1950-1964

Ю.Л. Климонтович испытал определенное влияние своих научных руководителей лишь на начальной стадии своей деятельности, что можно видеть по его дипломной работе [1] и кандидатской диссертации. Позже, абсолютно

* Ныне покойная. - Ред.

самостоятельно, Юрий Львович разработал совершенно новый подход к статистической теории плазмы. Основная новая идея (1957) состояла во введении случайной функции (фазовой плотности), построенной на динамических траекториях всех частиц $\mathbf{r}_i(t), \mathbf{p}_i(t)$ [3]

$$N(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = \sum_{i=1}^N \delta[\mathbf{r} - \mathbf{r}_i(t)] \delta[\mathbf{p} - \mathbf{p}_i(t)].$$

Данная функция удовлетворяет классическому уравнению Власова, которое является замкнутым (обозначим $x \equiv (\mathbf{r}, \mathbf{p})$),

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} - \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} U_{\text{eff}}(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) \frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} \right) N(x, t) = 0,$$

$$U_{\text{eff}}(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = U_{\text{ext}}(\mathbf{r}, t) + \int dx' \Phi(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) N(x', t)$$

в полной аналогии с полевыми операторами ψ, ψ^\dagger в квантовой теории поля. Поэтому Юрий Львович назвал свой метод «вторичным квантованием в фазовом пространстве». В настоящее время он называется просто «методом Климонтовича». В частности, этот метод дает следующее.

1. Статистические величины. Применение статистического усреднения дает одночастичную функцию распределения $\bar{N}(x, t) = n f_1(x, t)$, и непосредственно бесконечную цепочку уравнений Боголюбова (BBGKY), так как $\overline{N(x, t) \cdot N(x', t)} = n d(x - x') f_1(x, t) + n^2 f_2(x, x', t)$, а также все корреляционные функции g_2, g_3, \dots

2. Интегралы столкновения. Используя данный метод, Юрий Львович смог явно вычислить интегралы столкновения для неидеального газа и плазмы, включая интеграл Ландау и Ленарда - Балеску и сделать далеко идущие обобщения этих интегралов.

3. Флуктуации. Вычитанием средних значений получаем флуктуации плотности частиц $dN(x, t) = N(x, t) - n f_1(x, t)$ и полей dE . Метод Климонтовича позволяет развить полную неравновесную теорию флуктуаций..

4. Спектральные функции. Из анализа (двухвременных) корреляторов $dN dN$ и $dE dE$ непосредственно получают спектральные функции частиц и полей.

Ю.Л. Климонтович смог показать, что этот элегантный метод работает также в квантовом случае и может быть непосредственно обобщен на случай релятивистских систем [4,5]. Метод стал основой всей его последующей работы в многочисленных областях науки. Первое подробное изложение данного метода было дано в его известной монографии «Статистическая теория неравновесных процессов в плазме» (1964) [7]. Среди других ранних работ отметим его статьи:

- по электромагнитным флуктуациям в плазме, диэлектрической проницаемости и дисперсионному соотношению в квантовой плазме (1952) [2] (сделана в соавторстве с В.П.Силиным, за 2 года до работы Линдхарда);

- по квантовым кинетическим уравнениям для функций распределения, зависящих от времени и энергии (1956);

- по связанным кинетическим уравнениям для заряженных частиц и плазмонов (1959; независимо от Бома и Пайнса), по влиянию турбулентных возмущений и нелинейных волн на интеграл столкновения;

- по гидродинамическим приближениям (совместно с В. Эбелингом);

- обзор по неравновесной динамике плазмы (1960) [6] (в соавторстве с В.П.Силиным) оказал глубокое влияние на развитие статистической физики в целом, и, в частности, на разработку Келдышем оснований теории неравновесных функций Грина [E].

Эффекты неидеальности и электромагнитные процессы 1965-1980

Вскоре Ю.Л. Климонтович убедился, что обычные кинетические уравнения для идеальных газов и плазмы дают только равновесные результаты и перешел к выводу обобщенных кинетических уравнений [10,13]. В частности, он

- вывел немарковское уравнение Ландау;
- разработал концепцию разложения интегралов с запаздыванием;
- показал, что члены первого порядка в разложении с учетом нелокальности обеспечивают сохранение полной энергии;
- вывел из этих уравнений гидродинамические и газодинамические уравнения неидеальной системы;
- вывел на микроскопическом уровне поправки на неидеальность к термодинамическим (давление, энергия и т.д.) и кинетическим (проводимость, оптическое поглощение, формы спектральных линий и т.д.) величинам;
- получил интегралы столкновений в кинетических уравнениях в присутствии электромагнитных полей [14];
- сформулировал кинетические уравнения для атомов в электромагнитных полях и для частично ионизированной плазмы [14];
- систематизировал и развил теорию флуктуаций в газе, плазме и активных системах, включая нелинейные колебательные системы с обратной связью и лазеры [12].

Эти и многие другие результаты послужили основой двух его монографий: «Кинетическая теория неидеального газа и неидеальной плазмы» (1975) [13] и «Кинетическая теория электромагнитных процессов» (1980) [14].

Характерной чертой всех публикаций и монографий Ю.Л. Климонтовича являлось то, что он избегал частого обращения к формальным математическим аспектам. Его главной целью всегда были практические приложения, расчет характеристик, которые допускают измерение. С конца 1970-х годов Юрий Львович часто посещал своих бывших учеников и коллег в Восточной Германии и, в частности, в Ростокском университете. В мае 1979 года в Lähnwitz проходила конференция, посвященная явлениям переноса в плотной плазме. Эта конференция была предшественником серии PNP-конференций. Первая подобная конференция (с которой начался отсчет этих мероприятий) состоялась в Matzlow-Garwitz. Юрий Львович также принимал участие во многих последующих конференциях: в Wustrow (1980,1988), Biesenthal (1984), Greifswald (1986), Berlin/Gosen (1991), Rostock/Markgrafenheide (1993), Binz (1995), Rostock (1998), Greifswald (2000).

В 1984 году появилась книга, которую мы считаем первой публикацией трудов PNP-конференции [18]. В этой книге опубликованы две статьи Юрия Львовича (в соавторстве с Эбелингом, Крэфтом, Крэмпом, Репке, Шлангес и др.).

Принципы статистической физики и физики открытых систем 1982-1999

Опубликовав большое количество оригинальных статей в различных областях науки, многочисленные обзорные статьи и три адресованные специалистам монографии, Ю.Л. Климонтович решил собрать и изложить свои результаты и опыт в учебнике, который был бы доступен студентам. Эта работа оказалась очень успешной. Учебник «Статистическая физика» (1982) [15] является уникальным в своей области, так как полностью базируется на неравновесном подходе. Поэтому вся статистическая физика излагается внутренне последовательным образом. Юрию Львовичу удалось представить все разделы как части одной общей области физики (в ярком контрасте со многим стандартными

учебниками). В таком подходе многие связи между «обычно» независимыми областями и приложениями становятся очевидными

И последнее по порядку, но не по значению. Ю.Л. Климонтович очень много сделал для развития теории квантовой плазмы, излучения и квантовых открытых систем. Исследование взаимодействия излучения с квантовыми системами и, в частности, с квантовой плазмой, являлось центральной темой исследований Юрия Львовича. Он начал с этой темы в своей дипломной работе, которая была вскоре опубликована в его первой статье (в соавторстве с Фурсовым): «Влияние взаимодействия между молекулами на торможение излучением в классической теории дисперсии света» (1949) [1]. Наконец, он посвятил одну из последних своих книг [32] квантовой теории и теории излучения. Фундаментальные проблемы, в которых ему удалось существенно продвинуться, включают:

- вывод неидеальных квантовых кинетических уравнений;
- формулировку новой флуктуационно-диссипационной теоремы для диссипативных систем;
- флуктуационно-диссипационные соотношения для атомов в полях излучения;
- новые подходы к явлениям сверхтекучести и сверхпроводимости.

Заключение

Научная биография Юрия Львовича Климонтовича является неординарной и уникальной. Несмотря на непростые жизненные ситуации, он смог проделать огромную научную работу, которая позволила некоторым ученым назвать его «Больцманом XX века». Укажем только наиболее значимые достижения Ю.Л. Климонтовича в области теории плазмы:

- вывод кинетических уравнений для заряженных частиц и полей, учитывающих частичную ионизацию, взаимодействие с плазмонами, нелинейные волны, турбулентность и др.;
- создание микроскопической теории флуктуаций и ее приложение к кинетической теории гидродинамики;
- вывод квантовых кинетических уравнений и их релятивистские обобщения;
- самое важное: разработка метода микроскопической фазовой плотности (микроскопической плотности в фазовом пространстве), который останется одним из самых мощных и последовательных подходов в статистической физике.

Статьи, посвященные Ю.Л. Климонтовичу

A. Ebeling W., Romanovsky Yu.M. *On the 75th birthday of Yuri L. Klimontovich*, Contr. Plasma Physics **39**, 285-286 (1999).

B. Contr. Plasma Physics: **39**, № 4 (1999): Special issue with articles dedicated to Yu.L. Klimontovich's 75th birthday.

С. Анищенко В.С. *Ю.Л. Климонтович*. Изв. вузов Прикладная нелинейная динамика, 2003. Т. 10, № 6. С. 147-149.

Д. Гдалевич Г.И. *Памяти Юрия Львовича Климонтовича*. Научная газета «Наука и технология в России». Март 2003.

E. Bonitz M. *In memoriam Yuri Klimontovich*. P. vii in: *Progress in Nonequilibrium Green's Functions II*. M. Bonitz and Dirk Semkat (eds.), World Scientific Publ., Singapore 2003.

**Библиография книг, обзоров и избранных статей Ю.Л. Климонтовича
(в хронологическом порядке)**

1. *Климонтович Ю.Л., Фурсов В.С.* Влияние взаимодействия между молекулами на торможение излучением в классической теории дисперсии света. *ЖЭТФ* **19**, 819 (1949).
2. *Климонтович Ю.Л., Силин В.П.* О теории спектров возбуждения макроскопических систем. Докл. Акад. Наук **82**, 361 (1952); О спектрах систем взаимодействующих частиц, *ЖЭТФ* **23**, 151 (1952).
3. *Климонтович Ю.Л.* О методе «вторичного квантования» в фазовом пространстве. *ЖЭТФ* **33**, 982 (1957) [*Sov. Phys. JETP* **6**, 753 (1958)].
4. *Климонтович Ю.Л.* Релятивистские кинетические уравнения. *ЖЭТФ* **37**, 375 (1959); *ЖЭТФ* **38**, 1212 (1960).
5. *Klimontovich Yu.L.* Relativistic transport equations for a plasma. *Sov. Phys. JETP* **10**, 524 (1960); **11**, 876 (1960).
6. *Климонтович Ю.Л., Силин В.П.* О спектрах систем взаимодействующих частиц и коллективных потерях при прохождении заряженных частиц через вещество. *УФН* **70**, 247 (1960).
7. *Климонтович Ю.Л.* Статистическая теория неравновесных процессов в плазме. М.: Изд-во МГУ, 1964; Oxford: Pergamon Press, 1967.
8. *Климонтович Ю.Л.* Вопросы статистической теории взаимодействия атомов с излучением. *УФН* **101**, 577 (1970) [*Sov. Phys. Usp.* **13**, 480, 1971].
9. *Климонтович Ю.Л., Ковалев А.С., Ланда П.С.* Естественные флуктуации в лазерах. *УФН* **106**, 279 (1972).
10. *Климонтович Ю.Л., Эбелинг В.* Квантовые кинетические уравнения для неидеального газа и неидеальной плазмы. *ЖЭТФ* **63**, 905 (1972).
11. *Климонтович Ю.Л.* Кинетические уравнения для неидеального газа и неидеальной плазмы. *УФН* **110**, 537-568 (1973).
12. *Зейгер С.Г., Климонтович Ю.Л., Ланда П.С. и др.* Волновые и флуктуационные процессы в лазерах. М.: Наука, 1974; *Климонтович Ю.Л.* Квантовые генераторы света и нелинейная оптика. М.: Просвещение, 1966, 200 с.
13. *Климонтович Ю.Л.* Кинетическая теория неидеального газа и неидеальной плазмы. М.: Наука, 1975; Oxford: Pergamon Press, 1982.
14. *Климонтович Ю.Л.* Кинетическая теория электромагнитных процессов. М.: Наука, 1980; Springer, Heidelberg, 1982.
15. *Климонтович Ю.Л.* Статистическая физика. М.: Наука, 1982.
16. *Климонтович Ю.Л.* Диссипативные уравнения для многочастичных функций распределения. *УФН* **139**, 689-700 (1983).
17. *Ebeling W., Klimontovich Yu.L.* Selforganization and turbulence in liquids. Teubner, Leipzig, 1984.
18. *Ebeling W., Fortov V.E., Klimontovich Yu.L., Kovalenko N.P., Kraeft W.D., Krasny Yu.P., Kremp D., Kulik P.P., Riaby V.A., Röpke G., Rozanov E.E., Schlanges M.* Transport properties of dense plasmas. Birkhäuser, Basel, Boston, Stuttgart, 1984.
19. *Климонтович Ю.Л.* Флуктуационно-диссипационные соотношения. Роль конечного времени корреляции. Квантовое обобщение формулы Найквиста. *УФН* **151**, 309-332 (1987).
20. *Klimontovich Yu.L., Kremp D., Kraeft W.D.* Kinetic theory for chemically reacting gases and partially ionized plasmas. *Adv. Chem. Phys.* **68**, 175-253 (1987).
21. *Klimontovich Yu.L. and Bonitz M.* Evolution of the entropy of stationary states in selforganization processes in the control parameter space. *Z. Phys.* **B70**, 241 (1988).
22. *Климонтович Ю.Л.* Проблемы статистической теории открытых систем: критерии относительной степени упорядоченности состояний в процессах самоорганизации. *УФН* **158**, 59-91 (1989).
23. *Klimontovich Yu.L., Wilhelmson H., Yakimenko I.P., Zagorodny A.G.*

Statistical theory of plasma-molecular systems. Physics Reports **175**, 263 (1989); Климонтович Ю.Л., Вильгельмсон Х., Якименко И.П., Загородний А.Г. Статистическая теория плазменно-молекулярных систем. М.: Изд-во МГУ, 1990.

24. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. М.: Наука, 1990.

25. Климонтович Ю.Л. Нелинейное броуновское движение. УФН **164**, 811 (1994).

26. Климонтович Ю.Л. Критерии относительной степени упорядоченности в открытых системах. УФН **166**, 1231-1244 (1996).

27. Климонтович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем. Т. 1. М.: Янус, 1995.

28. Климонтович Ю.Л. Физика бесстолкновительной плазмы. УФН **167**, 23 (1997).

29. Климонтович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем. Т. 2. М.: Янус, 1995.

30. Климонтович Ю.Л. Что такое стохастическая фильтрация и стохастический резонанс? УФН **169**, 39-47 (1999).

31. Климонтович Ю.Л. Энтропия и информация открытых систем. УФН **169**, 443 (1999).

32. Климонтович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем. Т. 3. Теория квантовых открытых систем. М.: Янус, 2001.

33. Климонтович Ю.Л. Введение в физику открытых систем. М.: Янус-К, 2002. 284 с.

34. Климонтович Ю.Л. Штрихи к портретам ученых. Дискуссионные вопросы статистической физики (последняя рукопись, не опубликована).

*Перевод с английского Г.И. Стрелковой
под редакцией В.И. Емельянова и Ю.М. Романовского*

CONTRIBUTIONS OF YURI L. KLIMONTOVICH TO THE KINETIC THEORY OF NONIDEAL PLASMAS

*M. Bonitz*¹, *W. Ebeling*², *Yu. M. Romanovsky*³

¹ Rostock University, Physics Department, D-18051, Rostock, Germany,
e-mail: bonitz@uni-rostock.de, Phone: +0049 381 498 1608, Fax: +0049 381 498 1603

² Humboldt University, Physics Department, D-12489 Berlin, Germany

³ Lomonosov University, Physics Department, 119992 Moscow, Russia

We give a short summary of life and work of Yuri L. Klimontovich (1924-2002), in particular we discuss his work on nonideal plasma physics.