

Анализ распределения по энергии заряженных частиц в экспериментах по лазерному облучению мишеней

О. С. Гаранина, М. Ю. Романовский

Предложено новое описание распределения энергии заряженных частиц в эксперименте по облучению газовых D–T-мишеней мощным лазерным излучением. Используется ранее введенный авторами класс трехпараметрических функций, в основной части совпадающих с Больцмановским экспоненциальным распределением, а в асимптотической – со степенной (гиперболической) функцией. Результатами работы является уточнение эффективной температуры тепловой части распределения, а также и более точное определение количества высокоэнергетических частиц в его асимптотической части.

Ключевые слова: мощное лазерное излучение, эффективная температура, степенная асимптотика.

Введение

Многие элементарные процессы, а именно, диссоциация, возбуждение, ионизация осуществляются в основном частицами с энергиями значительно выше средней, или, как говорят, «хвостом» распределения. Поэтому точное знание поведения распределения в его асимптотической части исключительно важно. Достаточно сказать, что экспоненциально малое количество объектов с большим значением параметра при экспоненциальном распределении приводило (и приводит) к завышенным ожиданиям осуществимости некоторых важных проектов.

Примерами таких распределений со значительной, существенно превышающей обычную экспоненту асимптотикой служат зависимости количества землетрясений от их магнитуды, количества жителей городов от их величины и много других (см., например, [1]). В свою очередь, одним из главных подобных примеров уже в физике является генерация «горячих» электронов в экспериментах по прямому лазерному термоядерному

синтезу (ЛТС). Наличие значительной фракции таких электронов [2] приводит к быстрому прогреву ЛТС-мишени и к невозможности ее сжатия для реализации требуемой термоядерной реакции. Теоретическое обсуждение этого эффекта было начато в работах [3, 4], что привело, в конечном счете, к реализации других схем ЛТС.

Попытки описания асимптотик, особенно в физике, обычно наталкиваются на экспериментальное ограничение – энергия в таких небольших частях распределения должна варьироваться хотя бы в пределах нескольких порядков величины, что в физическом эксперименте сложно реализовать. Экспоненциальная часть распределения характеризуется некоторым коэффициентом нормализации, который обычно интерпретируется как некая эффективная температура. Асимптотика определяется показателем степени и характеризует количество частиц в этой асимптотике.

Обычно эффективная температура и показатель степени рассчитываются с помощью процедуры фитинга в различных прикладных программах (MatLab, Origin, и др.). В расчете температуры не всегда ясно, где находится первая точка распределения (малоэнергетичные частицы вообще обычно не фиксируются), а где последняя (здесь экспоненциальное распределение переходит в степенное). В степенном «хвосте» же распределения обычно достаточно велика ошибка измерения, количество экспериментальных точек в хвосте, как правило, ограничено, поэтому приближение к степенному закону (и к любому другому) на основании только нескольких выборочных точек является серьезной проблемой. Поэтому желательна единая аппроксимация всего распределения, уточняющая названные параметры и дающая инфор-

Гаранина Ольга Сергеевна¹, аспирант.
Романовский Михаил Юрьевич^{2,3}, начальник управления,
д.ф.-м.н.

¹ Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.
Тел. +7(985) 804-24-57. E-mail: garanina.olga@gmail.com

² Федеральное агентство научных организаций,
119334, Москва, Ленинский проспект, 32а.

Тел. +7(916) 702-70-62. E-mail: slon@kapella.gpi.ru
³ Московский технологический университет (МИРЭА).
Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2017 г.

© Гаранина О. С., Романовский М. Ю., 2018

мацию для определения механизма возникновения асимптотики.

В настоящей работе предложено описание экспериментальных распределений по энергиям ионов при сжатии D–T-мишеней лазерными импульсами в экспериментах по лазерному термоядерному синтезу на установке «Искра-4» (ВНИИЭФ).

Семейство мультипараметрических кривых с экспоненциальным «телом» кривой и степенной асимптотикой

Для того чтобы найти вид распределения с экспоненциальной основной частью (при малых и средних аргументах) и асимптотиками в виде степенных (гиперболических) функций, в работе авторов [5] было сделано математическое обобщение результатов расчета функции плотности вероятности (PDF) случайных блужданий. В результате был получен общий вид трехпараметрического семейства функций, которые при малых и средних значениях аргумента R (т. е. до нескольких значений эффективной температуры T) сводятся к функции, зависящей только от T :

$$W_T(R) \cong \frac{1}{T} \exp\left(-\frac{R}{T}\right), \quad (1)$$

$$W_{T2\theta}(R) = \frac{1}{\sqrt{\pi T}} \int_0^{\infty} \cos(x\sqrt{R}) \exp\left(-x\sqrt{\frac{\theta T}{2}}\right) \left(1 + x\sqrt{\frac{T}{2\theta}}\right)^{\theta} dx. \quad (2)$$

Кроме этой функции нам еще потребуется так называемая кумулятивная вероятность, которая определяется соотношением

$$F_{T\beta\theta}(R) = \int_R^{\infty} W_{T\beta\theta}(r) dr. \quad (3)$$

В сумме с обычной вероятностью распределения тогда эта функция всегда равна единице.

Заметим, что наиболее последовательно попытки описания степенных асимптотик экспоненциальных распределений были аккумулированы в [7]. Однако введение таких асимптотик было сделано только качественно. До работ [5, 6] количественного (точного) описания реализовано не было.

Аппроксимация экспериментальных распределений

Экспериментальные работы во ВНИИЭФ по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) начались в 1972 году по инициативе С.Б. Кормера и Г.А. Кириллова при активной поддержке

а при больших значениях R эти функции спадают как $R^{-\beta}$ (соответствующее доказательство приведено в [6]). Общий вид функции распределения плотности вероятности $W_{T\beta\theta}$ для различных значений β и подгоночного параметра θ приведен на рис. 1.

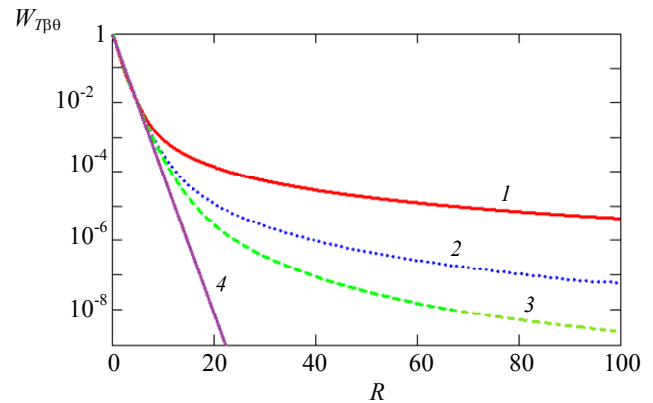


Рис. 1. Функции $W_{T\beta\theta}$ при $\beta = 2$ (кривая 1), $\beta = 3$ (кривая 2), $\beta = 4$ (кривая 3) в полулогарифмическом масштабе. Прямая 4 – экспонента $\exp(-R/T)$. Здесь $T = 1$, $\theta = 100$ при $\beta = 2$, $\theta = 20$ при $\beta = 3$, и $\theta = 10$ при $\beta = 4$.

В данной работе нам понадобится только функции с $\beta = 2$. Тогда общий вид функции плотности вероятности распределения будет выглядеть следующим образом:

Ю.Б. Харитона. Предполагалось сжать холодную термоядерную мишень в лазерном абляционном процессе, а затем ее нагреть до температур термоядерного синтеза. В результате в РФЯЦ-ВНИИЭФ появилось целое семейство мощных моноимпульсных установок «Искра» для дейтерий-тритиевого синтеза (ДТС).

В 1979 году начала работу 10-гераватная одноканальная установка «Искра-4». На выходе многокаскадного однопучкового лазера «Искра-4» (длина волны излучения – 1,315 мкм, световая апертура – 41 см, энергия лазерного импульса $E_L \sim 1\text{--}2$ кДж) длительность светового импульса на половине мощности равнялась $\tau_L \sim 100\text{--}300$ пс, расходимость излучения по уровню 80 % энергии составляла $(2\text{--}3) \times 10^{-4}$ рад. При экспериментах по лазерному термоядерному синтезу четыре лазерных пучка (тетраэдрическая конфигурация) воздействовали на сферическую термоядерную мишень. На этой установке была проведена большая серия экспериментов с облучением различного рода мишеней, в частности, на ней был получен рекордный тогда для России на мишенях прямого

облучения (МПО) выход термоядерных нейтронов $\sim 10^8$ и на сферических мишенях с обращенной короной (МОК) $\sim 2 \times 10^9$ ДД-нейтронов. В мишенях типа МОК была достигнута температура ионов ДТ порядка 7 кэВ.

В нашей работе мы будем анализировать распределения ионов дейтерия и трития, полученные в экспериментах по лазерному термоядерному синтезу на установке «ИСКРА-4» [8]. Эти экспериментальные распределения были аппроксимированы, причем для аппроксимации использовалась функция (3) с плотностью вероятности (2), т. е. в начальной части аппроксимационная функция описывается экспоненциальным распределением, а в асимптотической части – степенным $\sim 1/E$, где E – энергия ионов. Результаты представлены на рис. 2 в полулогарифмическом масштабе и (для большей наглядности) на рис. 3 в двойном логарифмическом масштабе.

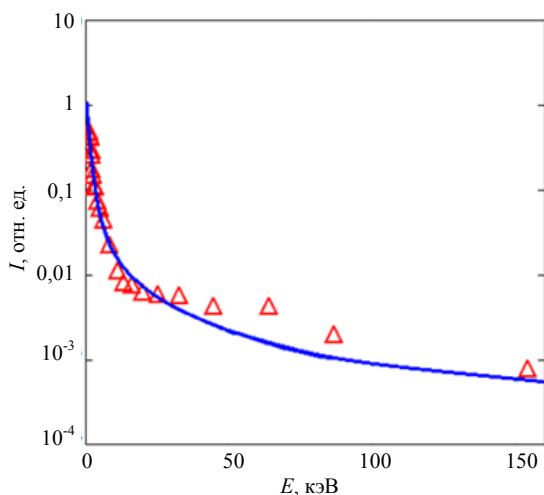


Рис. 2. Распределение ионов по энергиям E в полулогарифмическом масштабе (открытые треугольники) и аппроксимация функцией (2) с $\beta = 2$ (сплошная кривая). $T = 1$ кэВ, $\theta = 20$.

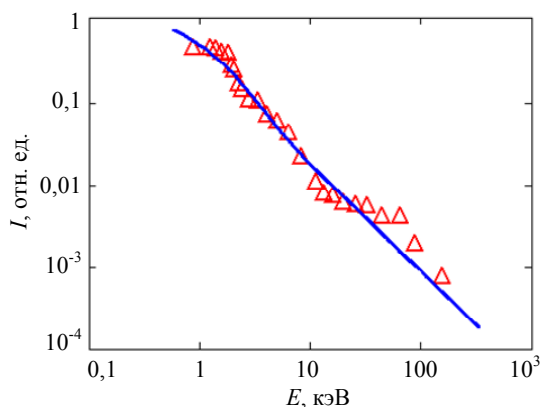


Рис. 3. Распределение ионов по энергиям E и ее аппроксимация в двойном логарифмическом масштабе.

Из анализа экспериментальных данных следует, что измерялась также кумулятивная вероятность

найти ион со скоростью (с «энергией») большей определенного значения. Из рис. 1 и 2 видно удовлетворительное согласие развитой в работах [5, 6] аппроксимации с экспериментальными данными. Но при этом важно отметить, что температура тепловой части распределения оказалась равной 1 кэВ, что заметно меньше значения, определенное ранее из простых экспериментальных оценок.

Заключение

В работе развит метод анализа экспериментальных распределений с «тяжелыми хвостами». Точное знание поведения распределения в его асимптотической части исключительно важно для многих областей физики.

В данной статье анализ распределения по энергиям заряженных частиц, получаемых в экспериментах по лазерному термоядерному синтезу, проведен с помощью аппроксимирующих функций плотности вероятности (2) и кумулятивной вероятности (3). Он показывает удовлетворительное согласие теории с экспериментом. По-видимому, при такой аппроксимации параметры разлета заряженных частиц, в частности, температура тепловой части их распределения оказываются несколько меньшими, чем считалось ранее. Степенная асимптота также предполагает относительно большее количество быстрых заряженных частиц, чем это дает простое экспоненциальное распределение – даже и нетепловое. Всё это может быть одной из причин неудач различных схем лазерного термоядерного синтеза.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН 1.21П «Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения».

ЛИТЕРАТУРА

1. Newman M. E. J. // Contemporary Physics. 2005. Vol. 46. No. 5. P. 323.
2. Rupin B., Burkhalter P., Young F., et al. // Phys. Rev. Lett. 1975. Vol. 34. P. 1313.
3. Mason R. J. // Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 42. P. 239.
4. Kephart C., Godwin R., McCall G. // Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 43. P. 1975.
5. Romanovsky M. Yu., Garanina O. S. // Physica A. 2015. Vol. 427. P. 1.
6. Romanovsky M. Yu., Vidov P. V. // Physica A. 2011. Vol. 390. P. 3794.
7. Bouchaud J.-P., Potters M. Theory of Financial Risks – Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
8. Бельков С. А., Богуненко Ю. Д., Гаранин С. Г., Еременко Ю. Н., Кириллов Г. А. и др. Диагностика плазмы: сб. статей, вып. 6. – М.: Энергоиздат, 1989. С. 199–202.

New representation of charged particles energy distributions in experiments on laser irradiation of targets

O. S. Garanina¹ and M. Yu. Romanovsky^{2,3}

¹A. M. Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: garanina.olga@gmail.com

²Federal Agency for Scientific Organization
32 A Leninsky prospekt, 119334, Moscow, Russia
E-mail: slon@kapella.gpi.ru

³Moscow Technological University (MIREA)
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

Received December 14, 2017

New representation of charged particles energy distributions in the experiment on the powerful laser irradiation of D-T targets is proposed. There are three-parameters functions formerly introduced by authors. The functions coincide with exponential Boltzmann function in the main part, and with power-law (hyperbolic) function in the tail. The results have obtained the clarification of an effective temperature of the energy distribution in the thermal (exponential) part of the functions and more precise calculation of the high-energy particle quantity in the tail of the distribution.

Keywords: powerful laser radiation, effective temperature, power law asymptotic.

REFERENCES

1. M. E. J. Newman, Contemporary Physics **46** (5), 323 (2005).
2. B. Rupin, P. Burkhalter, F. Young, et al., Phys. Rev. Lett. **34**, 1313 (1975).
3. R. J. Mason, Phys. Rev. Lett. **42**, 239 (1979).
4. C. Kephart, R. Godwin, and G. McCall, Phys. Rev. Lett. **43**, 1975 (1979).
5. M. Yu. Romanovsky and O. S. Garanina, Physica A **427**, 1 (2015).
6. M. Yu. Romanovsky and P. V. Vidov, Physica A **390**, 3794 (2011).
7. J.-P. Bouchaud and M. Potters, *Theory of Financial Risks* (Cambridge University Press, Cambridge, 2000).
8. S. A. Bel'kov, Yu. D. Bogunenko, S. G. Garanin, Y. N. Eremenko, G. A. Kirillov, G. G. Kochemasov, et al., in *Book: Diagnosis of Plasma, Vol. 6* (Moscow: Energoizdat, 1989), p. 199–202 [in Russian].