

# СВЯЗЬ ШИРОКОПОЛОСНОГО СПЕКТРА КРОСС-КОРРЕЛЯЦИОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ С НЕЛОКАЛЬНОСТЬЮ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ТОКАМАКАХ <sup>\*)</sup>

<sup>1,2</sup>Кукушкин А.Б., <sup>1</sup>Куличенко А.А.

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, ,

<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, Россия.

Нелокальность гидродинамической турбулентности газов и жидкостей была впервые найдена Ричардсоном [1]: его эмпирический закон (Richardson  $t^3$  law) для среднего квадрата взаимного удаления пары частиц в жидкой или газообразной среде,  $r^2 \sim t^3$ , существенно отличается от такового для обычной, броуновской диффузии,  $r^2 \sim t$ . Ключевым шагом в развитии теории нелокальности различных процессов в физике и других науках на основе концепции полетов Леви [2] и прогулок Леви, обобщающих полеты Леви на случай учета конечной скорости переносчиков (см. обзор [3]), стала идея Шлезингера и коллег [4] о возможности описания нелокальности турбулентности с помощью линейного интегро-дифференциального уравнения с ядром, медленно спадающим с расстоянием. В [5, 6] был предложен подход, близкий по духу к [4]. За основу был взят формализм типа уравнения Бибермана-Холстейна для переноса возбуждения фотонами в газах и плазме [7], обобщенного на учет конечности скорости переносчиков возбуждения. Такого рода формализм уже использовался в [8] для описания нестационарного переноса тепла в замагниченной плазме электронными бернштейновскими волнами в обобщение формализма интегрального по пространственным переменным уравнения стационарного переноса тепла таким волнами в [9]. В [5, 6] было показано, что флуктуации плотности плазмы, наблюдаемые в токамаке Т-10 с помощью кросс-корреляционной рефлектометрии ЭМ волн [10, 11], могут иметь турбулентное происхождение: показатель спада в распределении Леви для вероятности длины свободного пробега флуктуаций плотности поперек сильного магнитного поля (т.е. по малому радиусу) в токамаке Т-10, найденный путем решения обратной задачи из спектральной и радиальной зависимости измеренной кросс-корреляционной функции, оказался близок к его аналогу в эмпирическом законе Ричардсона.

В настоящей работе в развитие подхода [5, 6] получена аналитическая связь между формой «крыльев» спектров кросс-корреляционной рефлектометрии (т.н. широкополосных спектров рассеяния и кросс-корреляций) и далекими пролетами флуктуаций, т.е. «хвостовой» частью функции распределения флуктуаций плотности по длине их свободного пробега.

## Литература

- [1]. Richardson L.F. 1926 Proc. Roy. Soc. **110**, 709.
- [2]. Shlesinger M., Zaslavsky G.M., Frisch U., Eds. *Lévy Flights and Related Topics in Physics* (Springer: Berlin/Heidelberg), 1995.
- [3]. Zaborudae V., Denisov S., Klafter J. *Lévy walks* 2015 Rev. Mod. Phys. **87**, 483.
- [4]. Shlesinger M.F., West B.J., Klafter J. 1987 Phys. Rev. Lett. **58**, 1100.
- [5]. Kukushkin A.B., Kulichenko A.A. 2022 Symmetry **14**(6), 1265 (32 pages).
- [6]. Кукушкин А.Б., Куличенко А.А. 2022 Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез **45**(2), 105-122.
- [7]. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. *Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы*. М.: Наука, 1982.
- [8]. Кукушкин А.Б., Лисица В.С., Савельев Ю.А., Письма в ЖЭТФ **46**, 356 (1987).
- [9]. Rosenbluth M.N., Liu C.S. 1976 Phys. Fluids **19**, 815.
- [10]. Vershkov V.A., Soldatov S.V., Dreval V.V. 1999 Rev. Sci. Instrum. **70**, 1700.
- [11]. Urazbaev A.O., Vershkov V.A., Soldatov S.V., Shelukhin D.A. 2006 Plas. Phys. Rep. **32**, 443–460.

<sup>\*)</sup> DOI – тезисы на английском