

Т.П. Желонкина, С.А. Лукашевич, В.И. Яковенко

УО «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь

МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ В СОВРЕМЕННОМ КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Введение

Статистические методы наряду с квантовыми и релятивистскими составляют основу современной физики. После того как молекулярные воззрения получили господство в физике, появление в физических теориях статистических методов исследования стало неизбежным

Применение методов классической статистики в теории излучения абсолютно черного тела привело к величайшей революции в области физики – появлению квантов, созданию квантовой теории. На основе представлений Планка о дискретных значениях энергии осциллятора начала развиваться квантовая статистическая теория. Квантовая теория является принципиально статистической. Если в классической статистике движение каждой частицы могло быть рассчитано по законам Ньютона, а статистические закономерности применялись к огромному числу частиц, то в квантовой теории одни и те же статистические закономер-

ности описывают как поведение отдельной микрочастицы, так и совокупности их.

Идеи, методы статистической физики должны найти широкое применение в современном курсе общей физики. На протяжении всего курса физики необходимо формировать и развивать статистические представления. Уже при изучении механики необходимо говорить о существовании двух видов закономерностей: динамических и статистических. Причем наиболее глубокое описание любого процесса дается с помощью статистических закономерностей, а соответствующая динамическая теория, если она вообще возможна, является более глубоким приближением к истине. Такие понятия статистической физики, как вероятность и плотность вероятности, статистические средние физических величин, флуктуации физических величин в состоянии равновесия, функции распределения должны работать на протяжении всего курса физики.

1. Флуктуации

Статистическая физика допускает возможность самопроизвольного выхода замкнутой системы из равновесного состояния. При этом система переходит из более вероятного состояния в менее вероятное и энтропия её уменьшается. Такой процесс характеризуется флуктуациями – отклонениями физических величин от средних значений. При малом числе частиц флуктуации становятся настолько значительными, что динамическое описание теряет смысл.

Количественно флуктуации могут быть изучены при рассмотрении броуновского движения. Броуновское движение – это первое детально исследованное явление, вызванное флуктуациями. Теория броуновского движения имеет принципиальное значение, проясняя статистическую природу второго начала термодинамики и показывая границы его применимости. Второе начало термодинамики, несмотря на его общность, не имеет абсолютного характера, и отклонения от него (флуктуации) являются вполне закономерными. Примером таких флуктуационных процессов являются броуновское движение тяжёлых частиц, возникновение зародышей новой фазы при фазовых превращениях, самопроизвольные флуктуации температуры и давления в равновесной системе и т. д.

При рассмотрении броуновского движения выявляется важная особенность – здесь статистический закон в определённом смысле присущ движению одной частицы. Подчеркнув этот факт в данном месте, мы облегчим в дальнейшем восприятие того, что в квантовой теории одни и те же статистические закономерности описывают как поведение отдельной микрочастицы, так и совокупности их. Методы статистической физики могут применяться не только к огромному числу частиц, но на определённом уровне изучения, и к одной частице.

Теория флуктуаций в дальнейшем используется при рассмотрении явлений переноса в жидкостях, критической опалесценции, изменении кинетических процессов вблизи критического состояния, электрических флуктуаций, флуктуаций числа фотонов в световых потоках малой интенсивности, рассеяния волн на флуктуациях плотности среды.

Систематическое углубление понятия о флуктуациях поможет правильно восприятию очень сложного понятия физического вакуума и всех явлений, связанных с ним. Вакуум является суперпозицией нулевых колебаний поля флуктуационного характера, т. е. состояний с виртуально возникающими и исчезающими фотонами, электронно-позитронными парами частиц и античастиц. Энергия этих колебаний равна

$$\varepsilon_0 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2} \hbar \omega_k. \quad (1)$$

Число степеней свободы поля бесконечно велико. Квантовые флуктуации поля неустранимы, и при взаимодействии электромагнитного поля с заряженными частицами они приводят к эффектам, наблюдаемым экспериментально. Сбрасывание атомов с возбуждённых уровней в стационарное состояние происходит под действием нулевых колебаний поля (спонтанные излучения в вакууме). Сдвиг уровней энергии атомов (опыт Лэмба-Резерфорда) объясняется наличием двух явлений: взаимодействием электрона с виртуально излучаемыми фотонами (изменяется эффективная масса электрона) и поляризацией вакуума (искажается кулоновское поле ядра на малых расстояниях от него).

2. Функция статистического распределения

Понятие о функции распределения «работает» на протяжении всего курса физики. Впервые с ним знакомятся при изучении идеальных газов. Целесообразно ввести барометрическую формулу, затем обобщить её для случая потенциальных полей внешних сил, получив функцию распределения Больцмана.

$$n = n_0 e^{-\frac{U}{k\tau}}; \quad \omega = c e^{-\frac{U}{k\tau}}. \quad (2)$$

Формула Больцмана в дальнейшем может быть использована при рассмотрении:

- распределения молекул по скоростям $\omega = c e^{-\frac{mu^2}{2k\tau}}$;

- зависимости от температуры давления насыщенного пара $\rho = A T e^{-\frac{U_0}{k\tau}}$

и диффузии $D = A e^{-\frac{U}{k\tau}}$;

- распределения атомов по энергетическим уровням $N_n = N_0 e^{-\frac{E_n}{k\tau}}$;
- излучения абсолютно чёрного тела по Эйнштейну.

В формировании статистических представлений очень важным является раздел «твёрдое тело», так как здесь появляется возможность ввести квантовые идеи, квантовые статистики – Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака. При рассмотрении теплоёмкости твёрдых тел необходимо остановиться на модели Эйнштейна. Согласно его теории тепловые свойства решётки, состоящей из N колеблющихся атомов, можно трактовать как свойства $3N$ независимых одномерных гармонических осцилляторов, имеющих одну и ту же собственную частоту ω , с энергией $\varepsilon_{осц} = \hbar\omega\left(n + \frac{1}{2}\right)$:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\sum \hbar\omega\left(n + \frac{1}{2}\right) e^{-\frac{\hbar\omega\left(n + \frac{1}{2}\right)}{k\tau}}}{\sum e^{-\frac{\hbar\omega\left(n + \frac{1}{2}\right)}{k\tau}}} = \frac{\hbar\omega}{2} + \frac{\hbar\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{k\tau}} - 1}, \quad (2)$$

где $\frac{\hbar\omega}{2} = \varepsilon_0$ – нулевая энергия колебания с данной частотой;

$$\langle n \rangle = \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{k\tau}} - 1} - \text{функция распределения Планка.}$$

Получив функцию распределения Планка, следует перейти к статистике Бозе-Эйнштейна

$$\langle n \rangle = \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega - \mu}{k\tau}} - 1}, \quad (3)$$

где μ – химический потенциал, зависящий от природы частицы. Для фотонов $\mu = 0$. Далее необходимо говорить о принципе Паули и ввести статистику Ферми-Дирака, применив её к электронам в металлах:

$$\langle n \rangle = \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega - \mu_F}{k\tau}} + 1}; \quad \langle \varepsilon \rangle = \varepsilon_0 + BT^2. \quad (4)$$

В этом разделе вводятся понятия вырожденного газа, температуры вырождения. Газ, свойства которого существенно отличается от свойств классического идеального газа, вследствие взаимного квантово-механического влияния частиц, называется вырожденным. Его особые свойства могут проявляться только при достаточно низких температурах – ниже так называемой температуры вырождения:

$$T_0 = \frac{\hbar^2}{3mk} \left(\frac{N}{V} \right)^{2/3}. \quad (5)$$

В обычных атомных или молекулярных газах вырождение, как правило, не наступает: при охлаждении газ превращается в жидкость при более высоких температурах, чем температура вырождения. Явление вырождения крайне существенно при рассмотрении электронного газа $T_0 \approx 10^4 \text{ K}$. Здесь необходимо рассмотреть границы применимости классической статистики Больцмана-Максвелла как предельного случая квантовых статистик. В дальнейшем статистикой Ферми-Дирака пользуются при рассмотрении термоэлектронной эмиссии, контактных явлений и т. д.

Переходя к магнетизму необходимо подчеркнуть, что определение намагниченности магнетиков принципиально не возможно в рамках классической физики, так как из общих положений классической статистики следует, что магнитный момент любого магнетика в стационарном состоянии всегда равен нулю, что противоречит опыту. Объяснение магнитных свойств вещества возможно только на основе квантовой теории.

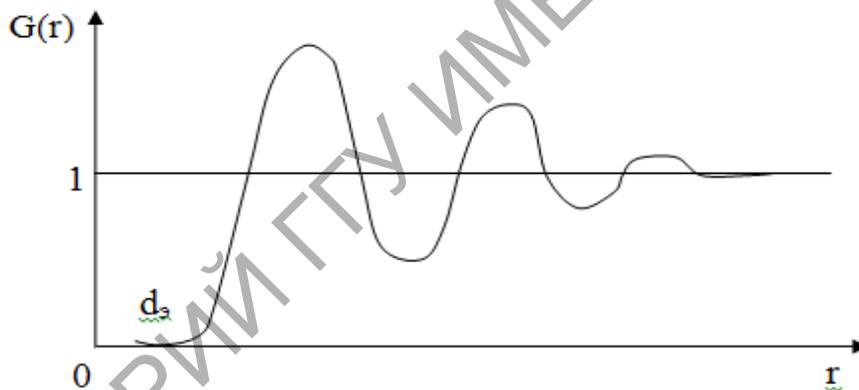


Рисунок 1 – Радиальная функция распределения

Необходимо остановиться на статистических идеях в теории жидкости. Понятие ближнего порядка может быть объяснено только на основе статистических представлений с введением радиальной функции распределения $G(r)$. Она определяет вероятность обнаружения некоторой частицы жидкости на расстоянии от r до $r+dr$ от некоторой другой фиксированной частицы (рисунок 1). При $r < d_s$, $G(r) = 0$ (d_s – эффективный диаметр частицы). Эта область взаимной «непроницаемости» частиц. Области максимумов соответствуют наиболее вероятным взаимным расстояниям между ближними частицами в жидкости. При $r \gg d_s$, $G(r) = 1$, т. е. все взаимные расположения далёких частиц оказываются равновероятными.

При низких температурах и больших плотностях максимумы становятся более резкими. Однако общий ход функции $G(r)$ остаётся неизменным.

Заключение

Опыт преподавания курса общей физики доказывает, что идеи, методы статистической физики должны находить широкое отражение в современном курсе физики. На протяжении изучения всего курса физики необходимо формировать и развивать статистические представления. Уже при изучении механики необходимо говорить о существовании двух видов закономерностей: динамических и статистических.

Литература

1. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Том 2. Термодинамика и молекулярная физика / Д.В. Сивухин. – Москва : Наука, 1975. – 552 с.
2. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Том 3. Электричество / Д.В. Сивухин. – Москва : Наука, 1977. – 688 с.
3. Матвеев, А.Н. Молекулярная физика / А.Н.Матвеев. – Москва : Высшая школа, 1981. – 400 с.