

фотона возрастает во много раз, и радифотон превращается в фотон рентг. излучения, энергия же электрона меняется незначительно. Поскольку этот процесс повторяется многократно, электрон постепенно теряет всю энергию. Наблюдаемое со спутников и ракет рентг. фоновое излучение, по-видимому, частично обязано своим происхождением этому процессу.

Протоны и ядра сверхвысоких энергий также подвержены воздействию фотонов М. ф. и.: при столкновениях с ними ядра расщепляются, а соударения с протонами приводят к рождению новых частиц (электрон-позитронных пар, пионов и т. д.). В результате энергия протонов быстро уменьшается до пороговой, ниже к-рой рождение частиц становится невозможным по законам сохранения энергии и импульса. Именно с этими процессами связывают практич. отсутствие в космич. лучах частиц с энергией  $\approx 10^{20}$  эВ, а также малое кол-во тяжёлых ядер.

Лит.: Зельдович Я. Б., «Горячая модель» Вселенной, «УФН», 1966, т. 89, с. 647; Вайнберг С., Первые три минуты, пер. с англ., М., 1981. Р. А. Сюняев.

**МИКРОДОЗИМЕТРИЯ** — исследование микроскопич. распределения поглощённой энергии при воздействии ионизирующего излучения на объект (живой или неживой природы) и установление связи между параметрами этого распределения и откликом объекта на его облучение (радиационно-индуцированный эффект). Наблюдаемый радиац. эффект — результат сложных физ., физ.-хим. и биохим. процессов, вызванных поглощением энергии в его чувствит. структурах. Так, в полупроводниковых приборах чувствит. структурой может быть область  $p-n$ -перехода, или *гетероперехода*, в живом организме — клетка, в клетке — ядро, мембрана, хромосомы, молекула ДНК и т.п. В чувствит. областях возникают первичные «повреждения» (ионизация и возбуждение атомов и молекул, диссоциация молекул, выбивание атомов и ионов из узлов кристаллич. решётки и др.), дающие начало цепочкам превращений, к-рые в конечном счёте приводят к наблюдаемому макроскопич. эффекту. В этих условиях отклик на облучение должен определяться не столько поглощённой дозой  $D$ , сколько распределением поглощённой энергии  $f(Z)$  по микрообъёмам для разных видов излучения. Осн. величиной в М. является т. н. уд. энергия  $Z$ , равная переданной энергии  $\epsilon$  малому объёму вещества, отнесённой к массе  $m$  этого объёма:  $Z = \epsilon/m$ . Акты передачи энергии внутри микрообъёма при попадании в него заряж. частицы являются случайными событиями. Вероятностный характер поглощения приводит к флуктуациям  $Z$ , к-рые тем значи-

Флуктуации уд. энергии существенны для объёмов с линейными размерами  $\sim 1$  мкм.

Переданная в микрообъём энергия равна разности между суммарной кинетич. энергией всех ионизирующих частиц, попавших в данный микрообъём, и энергией частиц, покинувших его (в сумме с увеличением энергии внутри объёма за счёт ядерных реакций). Ср. энергия по микрообъёмам рассматривается как интегральная доза  $D$  в объёме:

$$D = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \int_0^{\Delta m} f(Z) dZ.$$

Стохастич. аналог ЛПЭ — т. н. линейная энергия  $y = \epsilon/l$ , где  $l$  — ср. длина хорды рассматриваемого микрообъёма (измеряется в КэВ·мкм<sup>-1</sup>). Распределение  $f(Z)$ , соответствующее определ. величине поглощённой дозы  $D$ , может быть записано в виде  $f(Z, D)$ . Пусть, напр., гибель клеток при облучении наступает тогда, когда уд. энергия  $Z$  в чувствит. объёме клетки превосходит нек-рое критич. значение  $Z_{кр}$ . При этом доля  $s$  клеток, выживших после облучения:

$$s(D) = \int_0^{Z_{кр}} f(Z, D) dZ.$$

В реальном случае, когда вероятность выживания клетки при поглощённой в её чувствит. объёме уд. энергии описывается как  $\Psi(Z)$ :

$$s(D) = \int_0^{\infty} f(Z, D) \Psi(Z) dZ.$$

Ф-ция  $f(Z, D)$  может быть измерена или вычислена для разных микрообъёмов, а левые части соотношений найдены экспериментально.

М. применяют как для выявления закономерностей биол. действия разл. ионизирующих излучений, так и для оптим. планирования облучения в медицине. Микродозиметрич. метод используют также для исследования радиац. повреждений в твердотельной электронике.

Лит.: Иванов В. И., Лысцов В. Н., Основы микродозиметрии, М., 1979; Иванов В. И., Лысцов В. Н., Губин А. Т., Справочное руководство по микродозиметрии, М., 1986; Микродозиметрия. Доклад 36 МКРЕ, пер. с англ., М., 1988. В. И. Иванов.

**МИКРОКАНОНИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГИББСА** — равновесное распределение вероятностей для статистич. ансамбля систем с заданной полной энергией  $\mathcal{E}$  при пост. объёме  $V$  и пост. полном числе частиц  $N$ ; соответствует микроканоническому ансамблю Гиббса. Установлено Дж. У. Гиббсом (J. W. Gibbs) в 1904 для случая классич. статистики как один из осн. законов статистической физики.

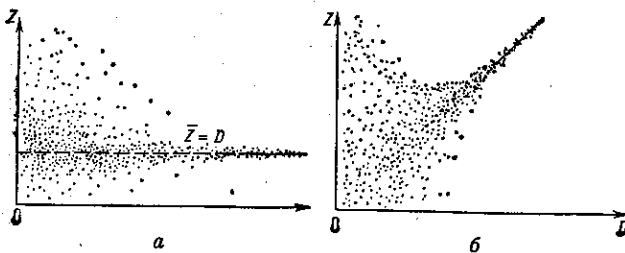
В классич. статистич. механике ф-ция распределения  $f(p, q)$  зависит от координат и импульсов  $p, q$  всех частиц через Гамильтона функцию  $H(p, q)$ , к-рая является интегралом движения системы. Согласно М. р. Г., все микроскопич. состояния в узком слое энергии  $\Delta \mathcal{E} \ll \mathcal{E}$  равновероятны, а вероятности др. состояний равны нулю, т. е.

$$f(p, q) = \begin{cases} W^{-1}(\mathcal{E}, N, V) & \text{при } \mathcal{E} \leq H(p, q) \leq \mathcal{E} + \Delta \mathcal{E}, \\ 0 & \text{вне этого слоя,} \end{cases}$$

$W(\mathcal{E}, N, V)$  — статистич. вес, определяемый из условия нормировки (суммарная вероятность пребывания системы во всех состояниях равна 1). Следовательно,

$$W(\mathcal{E}, N, V) = (N! h^{3N})^{-1} \int dp dq, \\ H(p, q)$$

$$dp dq = dp_1 dq_1, \dots, dp_{3N} dq_{3N};$$



тельнее, чем меньше объём (рис. а, б), меньше доза излучения и чем больше линейные потери энергии (ЛПЭ) ионизирующих частиц. Величину флуктуаций можно проиллюстрировать на след. примерах: при дозе  $10^{-2}$  Гр  $\gamma$ -излучения отклонение  $Z$  от ср. значения  $\bar{Z}$  в объёме живой клетки  $\sim 10\%$ . При такой же дозе нейтронного излучения (значительно большие ЛПЭ) флуктуации таковы, что в 9 клетках из 10  $Z = 0$ , а в каждой 10-й клетке может превышать  $\bar{Z}$  в 10 раз; в объёме, занимаемом хромосомой (при той же дозе нейтронного излучения),  $Z = 0$  в 999 хромосомах из 1000, а в одной из них может превысить  $\bar{Z}$  в 1000 раз.