

# ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

А. Н. Горбань

**Цели:** ознакомить учащихся с законом радиоактивного распада; создать его компьютерную модель и программу на языке программирования; исследовать с помощью программы закон радиоактивного распада и установить его статистический характер; объяснить физические основы применения радиоуглеродного метода для определения возраста предметов органического происхождения в археологии.

**Тип урока:** изучение нового материала.

**Форма проведения:** интегрированный урок (физика + информатика).

**Продолжительность урока:** два академических часа.

**Оборудование:** таблица периодов полураспада некоторых радиоактивных элементов, компьютерный класс с ПК и инсталлированными на них пакетами Microsoft Office, интегрированной средой одного из языков программирования (QBASIC, PASCAL или другими).

## Структура урока и ориентировочное время

Этапы урока	Ориентировочные затраты времени
I. Организационный момент	1 мин
II. Актуализация опорных знаний	5 мин
III. Изучение нового материала	65 мин (40 мин — теоретическая часть, 25 мин — компьютерный эксперимент)
IV. Обобщение изученного материала	15 мин
V. Домашнее задание	1 мин
VI. Подведение итогов урока	3 мин

*Наука является внутренним большим целым. Ее распределение на отдельные области обусловлено не столько природой вещей, сколько ограниченной природой человеческого познания.*

М. Планк (1858–1948), немецкий физик и мыслитель

## Ход урока

### I. Организационный момент

### II. Актуализация опорных знаний

#### Фронтальный опрос

1. Что называется радиоактивностью?
2. Как можно разделить на составные части естественную радиоактивность?
3. Что представляют собой  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения?
4. Сформулируйте правила смещения при  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадах и запишите их схемы на доске, объясните.
5. Изменяется ли химическая природа элемента при его  $\gamma$ -распаде и почему?
6. Какие из известных вам законов сохранения выполняются при радиоактивном распаде?

### III. Изучение нового материала

#### 1. Объявление темы и структуры урока, постановка цели урока

Учитель обращает внимание учеников на эпиграф и подчеркивает, что явление радиоактивного распада будет рассмотрено на уроке с точки зрения основ разных наук: теоретически с позиций физики, его исследование будет проведено компьютерными и математическими (статистическими) методами, а также будут рассмотрены физические основы применения этого явления в археологии для определения возраста предметов.

#### 2. Изучение нового материала

##### Период полураспада

Резерфорд, исследуя со своими сотрудниками преобразование радиоактивных веществ, пришел к выводу, что их активность со временем уменьшается.

Было установлено:

1) Активность пропорциональна массе радиоактивного вещества.

2) Для одного и того же радиоактивного вещества наблюдается снижение активности в 2 раза через строго определенный промежуток времени, причем это время не зависит от состояния вещества, давления, температуры и любых других его параметров.

Для характеристики скорости снижения активности радиоактивного вещества были введены понятия периода полураспада  $T$ -времени, на протяжении

которого распадается половина из имеющегося количества радиоактивных атомов.

3) Скорость снижения активности у разных радиоактивных веществ разная.

**Закон радиоактивного распада**

Пусть в некоторый начальный момент времени  $t_0 = 0$  количество радиоактивных атомов равняется  $N_0$ . Тогда через промежуток времени  $t_1 = T$  их, согласно определению периода полураспада  $T$ , останется в 2 раза меньше, т. е.  $N_1 = \frac{N_0}{2}$ ;

через промежуток времени  $t_1 = 2T$  количество радиоактивных атомов снова уменьшится в 2 раза и будет равняться

$$N_2 = \frac{N_1}{2} = \frac{\frac{N_0}{2}}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}.$$

Рассуждая аналогично для промежутков времени, которые равняются  $3T, 4T, \dots, nT$ , делаем вывод, что через промежуток времени  $t = nT$  количество оставшихся атомов  $N$  можно найти по формуле:  $N = \frac{N_0}{2^n}$ . Поскольку  $n = \frac{t}{T}$ , то закон, согласно которому уменьшается количество радиоактивных атомов, имеет вид:

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (1)$$

Формулу (1) называют законом радиоактивного распада.

Следует иметь в виду, что в микромире, где объекты одного сорта по всем своим свойствам абсолютно одинаковы и их в принципе невозможно отличить друг от друга, действуют статистические, т. е. возможные законы, в соответствии с которыми распад конкретного атома является случайным событием, которое невозможно предусмотреть. Атомы ни в каком смысле не «стареют» в процессе своего существования. Для них существует лишь понятие среднего времени жизни  $\tau$  ( $\tau = 1,44T$ ), но не существует понятия возраста. По аналогии можно заметить, что подобная ситуация имела бы место для среднего возраста человека, если бы люди не старели, а погибали только от несчастных случаев.

**Построение компьютерной модели (алгоритма) явления радиоактивного распада**

Критерием истины, как известно, является практика. Это в полной мере касается физики как экспериментальной науки. В условиях, когда по понятным причинам повторить на уроке опыты Резерфорда, а значит, экспериментально доказать или опровергнуть теоретически выведенную зависимость  $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$  невозможно, особую ценность для более глубокого и наглядного изучения явления радиоактивного рас-

**Знакомство с таблицей «Период полураспада некоторых радиоактивных изотопов»**

Атомный номер химического элемента	Элемент	Обозначение изотопа	Период полураспада изотопа
1	Водород (тритий)	${}^3_1H$	12,3 года
6	Карбон	${}^{11}_6C$	20 минут
6	Карбон	${}^{14}_6C$	5600 лет
15	Фосфор	${}^{32}_{15}P$	14,3 суток
16	Сера	${}^3_{16}S$	87 суток
19	Калий	${}^{40}_{19}K$	$1,3 \cdot 10^9$ лет
19	Калий	${}^{42}_{19}K$	12,5 часа
20	Кальций	${}^{45}_{20}Ca$	165 суток
24	Хром	${}^{56}_{24}Cr$	28 суток
26	Железо	${}^{59}_{26}Fe$	45 суток
27	Кобальт	${}^{60}_{27}Co$	5,3 года
38	Стронций	${}^{89}_{38}Sr$	50,5 суток
47	Серебро	${}^{110}_{47}Ag$	270 суток
53	Йод	${}^{131}_{53}I$	8 суток
92	Уран	${}^{234}_{92}U$	$1,6 \cdot 10^5$ лет
92	Уран	${}^{235}_{92}U$	$7,1 \cdot 10^8$ лет
94	Плутоний	${}^{239}_{94}Pu$	24,4 года

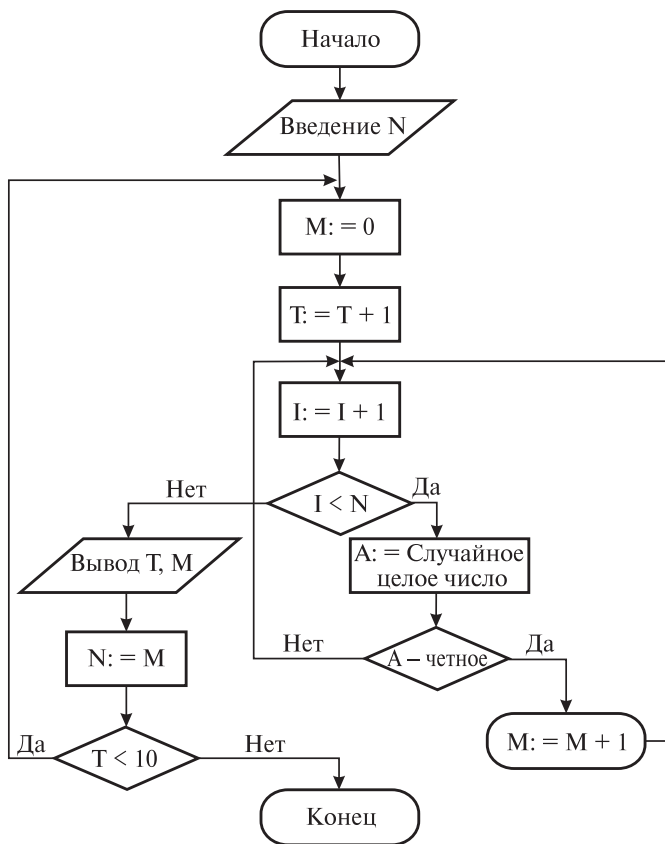
пада имеет компьютерный эксперимент, с помощью которого будет смоделировано это явление. Для его проведения создадим компьютерную модель радиоактивного распада и программу и, проведя ряд виртуальных экспериментов, исследуем, как соблюдается радиоактивный закон распада при разных начальных условиях.

**Постановка задачи.** Дано определенное количество радиоактивных атомов  $N$  ( $N \geq 1$ , целое число) с периодом полураспада  $T$ . Найти: сколько атомов  $M$  останется после каждого периода полураспада с 1-го по 10-й включительно.

**Построение модели.** Распад или нераспад радиоактивных атомов — это события случайные и равновозможные, которые могут произойти с каждым атомом за время периода их полураспада. Если в соответствие с этими событиями поставить генерированную ПК случайным и равновозможным образом последовательность целых чисел, в которой четное число будет интерпретироваться как нераспад радиоактивного атома, а нечетное — как факт его распада, то это дает возможность создать компьютерную модель явления радиоактивного распада и с помощью ПК всесторонне исследовать его.

**Разработка алгоритма.** Блок-схема алгоритма исследования явления радиоактивного распада для

10 периодов полураспада, записанного с помощью базовых структур, может иметь следующий вид:



**Примечание:**

- $N$  – начальное количество радиоактивных атомов;
- $M$  – количество радиоактивных атомов, оставшихся спустя промежуток времени, равный целому числу периодов полураспада ( $T, 2T, 3T, \dots, 10T$ );
- $T = T + 1$  – счетчик количества периодов полураспада;
- $I = I + 1$  – счетчик количества радиоактивных атомов;
- $M = M + 1$  – счетчик, подсчитывающий количество радиоактивных атомов из всего начального их количества  $N$ , которые не распались за время дежурного периода полураспада  $T$ ;
- $A = \text{СЛУЧАЙНОЕ ЦЕЛОЕ ЧИСЛО}$  – действие, которое обеспечивает генерацию ПК целого случайного числа;
- $A - \text{ЧЕТНОЕ}$  – условие четности числа  $A$  (если  $A$  – четное, т. е. выполняется указанное условие, то это интерпретируется в алгоритме как нераспад  $I$ -го атома и при выполнении этого условия срабатывает счетчик  $M := M + 1$ );
- $T < 10$  – условие, ограничивающее время 10-ю периодами полураспада;
- $N := M$  – действие, обеспечивающее исследование на распад количества радиоактивных атомов  $M$ , оставшихся спустя промежутки времени, кратные  $T, 2T, 3T, \dots, 10T$ ;
- $M := 0$  – действие, «обнуляющее» счетчик нераспавшихся атомов  $M := M + 1$  перед началом очередного циклического их исследования на распад.

Создание, настройка и тестирование программы на языке программирования (например, QBASIC, Turbo PASCAL или другом), проведение компьютерного эксперимента

Блок-схема приведенного выше алгоритма, записанная на языке QBASIC, т. е. программа, будет иметь следующий вид:

```

10 REM zakon_radioaktivnogo_raspada {Заголовок}
20 CLS {Очистка экрана}
30 INPUT N {Ввод исходного количества радиоактивных атомов N}
40 PRINT "t, nT", "M" {Вывод заголовков колонок результатов}
50 RANDOMIZE {Запуск генератора случайных чисел}
60 T=T+1 {Счетчик количества периодов полураспада}
70 M=0; {«Обнуление» счетчика нераспавшихся атомов перед началом следующего периода полураспада}
80 FOR I=1 TO N {Перебор атомов в цикле с 1-го по N-ный}
90 A=FIX(65533*RND(1)) {Генерация случайного целого числа A в диапазоне [0,65533]}
100 IF A/2=A\2 THEN M=M+1 {Условие четности числа A и счетчик M=M+1 нераспавшихся атомов}
110 NEXT I {Переход к исследованию на распад следующего I-го атома}
120 PRINT T; " T ", M {Вывод результатов}
130 N=M {Количество нераспавшихся (оставшихся) атомов}
140 IF T<10 THEN GOTO 60 ELSE 150 {Ограничение для количества периодов}
150 END {Конец программы}
    
```

Открыв файл QBASIC.EXE интегрированной среды QBASIC и набрав в нем приведенную выше программу, настроив и протестировав ее, можно провести виртуальный эксперимент по исследованию явления радиоактивного распада (обеспечить время непрерывной работы учеников за ПК – набор программы, проведение эксперимента и обработка результатов – не более чем 30 минут согласно требованиям).

**Выполнение программы.** Какое же количество радиоактивных атомов надо ввести в программу, чтобы получить достаточную статистическую точность эксперимента?

Как известно из основ статистики, статистическую точность эксперимента в процентах определяет так называемая относительная погрешность  $\Delta$ , которую находят по формуле  $\Delta = \frac{100\%}{\sqrt{N}}$  (2), где  $\bar{N}$  – среднее количество атомов в опыте.

Надо иметь в виду, что для изучения явления радиоактивного распада в лабораторных условиях достаточно 0,001 мг ( $10^{-9}$  кг) вещества. Поскольку количество атомов (молекул) может быть вычислено

по формуле  $N = \frac{mN_A}{M}$  (где  $m$  – масса вещества,  $N_A$  – число Авогадро,  $M$  – молярная (атомарная) масса), то, посчитав, например, количество атомов в 0,001 мг  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , получим:

$$N = \frac{10^{-9} \text{ кг} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{235 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} \approx 2,6 \cdot 10^{15}.$$

При числах такого порядка из-за ограниченной тактовой частоты ЦП ПК время обработки данных будет неприемлемо большим, поэтому можно ограничиться исследованием явления при  $N$  порядка  $10^7$ . При этом время обработки данных программой будет приблизительно 5 мин, а относительная погрешность  $\Delta$ , вычисленная по формуле (2), незначительной.

Введя  $N_0 = 16777216$  ( $2^{24}$ ) и 16 384 ( $2^{14}$ ) и выбрав 0 в качестве аргумента функции Randomize, получим:

?	16 777 216	?	16 384
nT	M	nT	M
1T	8388722	1T	8193
2T	4193922	2T	4152
3T	2095942	3T	2067
4T	1048511	4T	1049
5T	524898	5T	523
6T	262566	6T	261
7T	31125	7T	127
8T	65895	8T	65
9T	32969	9T	26
10 T	16457	10 T	14

Чтобы вычислить статистическую точность эксперимента, проведем еще 5 виртуальных серий радиоактивных распадов, введя для экономии времени расчетов начальное количество радиоактивных атомов  $N_0 = 1000000$  и выбрав  $-2, -1, 0, 1$  и  $2$  (возможно какое угодно число из интервала от  $-32768$  до  $32768$ ) в качестве аргумента Randomize. Время обработки программой этих данных при их вводе будет приблизительно 20 секунд для каждой серии, общее время всех 5 серий – не более чем 8–10 мин, с учетом времени для первой серии – не более чем 15 мин.

Получим такие результаты

? 1 000 000	? 1 000 000	? 1 000 000	? 1 000 000	? 1 000 000
? -2	? -1	? 0	? 1	? 2
nT M	nT M	nT M	nT M	nT M
1T 498550	1T 500296	1T 499693	1T 500494	1T 499139
2T 249309	2T 250225	2T 250529	2T 250091	2T 249245
3T 124885	3T 124715	3T 125342	3T 125298	3T 124505
4T 62433	4T 62292	4T 62341	4T 62914	4T 62111
5T 31326	5T 31077	5T 31084	5T 31490	5T 31324
6T 15782	6T 15623	6T 15316	6T 15711	6T 15656
7T 7888	7T 7798	7T 7759	7T 7909	7T 7871
8T 33916	8T 3947	8T 3892	8T 3914	8T 3970
9T 1935	9T 1968	9T 1926	9T 1943	9T 2034
10T 950	10T 973	10T 951	10T 944	10T 1036

Соответствующая программа на языке Turbo PASCAL буде иметь такой вид:

```

Program zakon_radioaktivnogo_raspada; {Заголовок}
Uses crt; {Использование модуля функций и
процедур CRT}
var {Раздел описания переменных}
  T,A: Integer; {T - счетчик периодов
полураспада, A - случайное число}
  N,I,M: Real; {N - исходное количество
атомов, I - счетчик атомов, M - количество
нераспавшихся атомов}
begin {Начало раздела операторов}
  ClrScr; {Очистка экрана}
  readln(N); {Ввод исходного количества
радиоактивных атомов N}
  writeln('n,M'); {Вывод заголовков колонок
результатов}
  Randomize; {Запуск генератора случайных
чисел}
  for T:=1 to 10 do {Цикл с 1-го по 10-ый
периоды полураспада T}
    begin {Начало составного оператора}
      while I<N do {Проверка условия при
входе в цикл}
        begin {Начало составного оператора}
          A:=random(65534); {Генерация слу
чайного целого числа A в диапазоне
[0,65533]}
          if A mod 2=0 then {Условие четности
числа A}
            M:=M+1; {Подсчет нераспавшихся
атомов}
          I:=I+1; {Переход к исследованию
следующего I-го атома}
        end; {Конец составного оператора}
        writeln(T,'T',M:2:0); {Вывод результатов}
        N:=M; {Количество нераспавшихся
(оставшихся) атомов}
        M:=0; {«Обнуление» счетчика нераспавшихся
атомов перед началом следующего периода
полураспада}
        I:=0; {«Обнуление» счетчика текущего
числа атомов перед началом следующего
периода полураспада}
      end; {Конец составного оператора}
    readkey; {Задержка экрана}
  end. {Конец раздела операторов и всей программы}

```

### Построение графика радиоактивного распада и анализ результатов, полученных в среде QBASIC

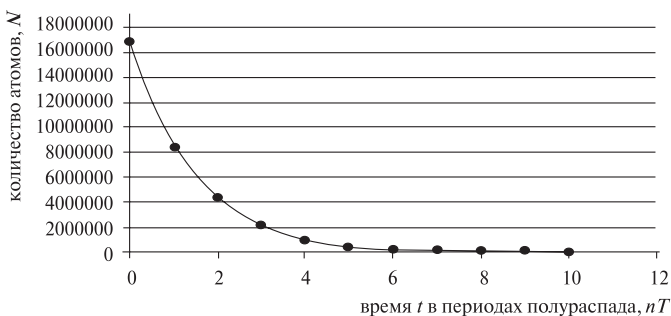
Используя возможности ТП Excel, по экспериментально полученным результатам построим график зависимости количества оставшихся радиоактивных атомов  $N$  (ось ординат) от времени  $t$  радиоактивного распада в периодах полураспада  $T$  (ось абсцисс), т. е. экспериментальную графическую зависимость  $N = f(N_0, t) = f(N_0, nT)$  для первой серии ( $N_0 = 16777216$ ), экспортировав в Excel данные, полученные в результате виртуального эксперимента в среде QBASIC (анализ результатов, полученных в Turbo PASCAL, проводится аналогично). Получим таблицу № 1 и следующий график:



Результаты виртуального компьютерного эксперимента, проведенного в среде Turbo PASCAL, будут аналогичными полученным в QBASIC, а именно:

? 16384	? 16777216	? 1000 000	? 1000 000	? 1000 000	? 1000 000	? 1000 000
nT M	nT M	nT M	nT M	nT M	nT M	nT M
1T 8184	1T 8388501	1T 500498	1T 500687	1T 498823	1T 500536	1T 499687
2T 4115	2T 4194366	2T 250469	2T 250244	2T 249112	2T 220055	2T 250245
3T 2063	3T 2097048	3T 125262	3T 125050	3T 124366	3T 125540	3T 125476
4T 1000	4T 1047527	4T 62305	4T 62592	4T 62182	4T 62817	4T 62924
5T 488	5T 524057	5T 31097	5T 31499	5T 31135	5T 31434	5T 31650
6T 231	6T 262372	6T 15589	6T 15687	6T 15521	6T 15836	6T 15828
7T 128	7T 131480	7T 7815	7T 7864	7T 7773	7T 8028	7T 7882
8T 63	8T 65774	8T 3905	8T 3908	8T 3921	8T 3938	8T 3920
9T 31	9T 32927	9T 1959	9T 1947	9T 1965	9T 2039	9T 1924
10T 15	10T 16539	10T 988	10T 987	10T 980	10T 1045	10T 951

График радиоактивного распада для  $N=16\ 777\ 216$



Обращаем внимание учеников на то, что полученный график совпадает с графиком функции  $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$ , который можно построить в НП GRAN1. (Принять:  $N_0 = 1$  усл. ед., а в диалоговом окне  $f^+$  (Ввод выражения зависимости) ввести:  $y(x) = 2^{-x}$ ;  $A = 0$ ;  $B = 10$ ), что подтверждает правильность работы программы и реальность полученных результатов.

Анализируя полученные результаты, делаем вывод 1: количество остающихся атомов после каждого периода полураспада уменьшается приблизительно в два раза (что и должно наблюдаться, т.к. это вытекает из определения периода полураспада). Причем это отношение тем точнее равняется 2, чем большее количество атомов исследуется. Этот вывод подтверждается расчетами как с использованием данных первой серии распадов при  $N_0 = 16777216$  ( $2^{24}$ ):  $\frac{16777216}{8388722} = 1,999973$ ;  $\frac{8388722}{4193922} = 2,000209$ ;  $\frac{4193922}{2095947} = 2,000968$  и т. д., так и данных других проведенных серий.

Чтобы сравнить, как зависит от начального количества атомов относительная погрешность  $\epsilon$  между количеством атомов, оставшихся во время проведения виртуального эксперимента  $N_{\text{эксп}}$ , от их количества

$N_{\text{теорет.}}$ , вычисленного теоретически по формуле (1), введем полученные данные в ТП Excel и вычислим  $\epsilon$  по формуле:

$$\epsilon = \frac{|N_{\text{эксп.}} - N_{\text{теорет.}}|}{N_{\text{теорет.}}} \cdot 100\%$$

Получим таблицы № 1 и № 2 с такими результатами

Таблица № 1

Количество периодов полураспада	$N_{\text{теорет.}}$	$N_{\text{комп.эксп}}$	$\epsilon$ , %	$\epsilon_{\text{среднее}}$ , %
0	16777216	16777216		
1	8388608	8388722	0,00136	
2	4194304	4193922	0,00911	
3	2097152	2095947	0,05746	
4	1048576	1048511	0,00620	
5	524288	524898	0,11635	0,199864
6	262144	262566	0,16098	
7	131072	131125	0,04044	
8	65536	65895	0,54779	
9	32768	32969	0,61340	
10	16384	16457	0,44556	

Таблица № 2

Количество периодов полураспада	$N_{\text{теорет.}}$	$N_{\text{комп.эксп}}$	$\epsilon$ , %	$\epsilon_{\text{среднее}}$ , %
0	16384	16384		
1	8192	8193	0,012207	
2	4096	4152	1,367188	
3	2048	2067	0,927734	
4	1024	1049	2,441406	
5	512	523	2,148438	4,244385
6	256	261	1,953125	
7	128	127	0,781250	
8	64	65	1,562500	
9	32	26	18,750000	
10	16	14	12,500000	

Анализируя данные таблиц № 1 и № 2, делаем вывод 2: относительная погрешность  $\varepsilon$ , т. е. расхождение между теоретическими и экспериментальными данными будет тем меньше, чем большее исходное количество радиоактивных атомов задействовано в виртуальном радиоактивном распаде.

Поскольку в статистике точность исследований определяют относительной погрешностью  $\Delta$ , которая

находится по формуле  $\Delta = \frac{100\%}{\sqrt{N}}$ , чтобы провести

более детальный количественный анализ полученных результатов последних 5-ти серий, экспортируем их также в ТП Excel (таблица № 3) и, используя его возможности, вычислим относительную погрешность  $\Delta$  этих серий экспериментов для каждого момента времени  $t$ , кратного периоду полураспада  $T$

Получим такие результаты:

Таблица № 3

$t, nT$	$N_{к.эксп}(-2)$	$N_{к.эксп}(-1)$	$N_{к.эксп}(0)$	$N_{к.эксп}(1)$	$N_{к.эксп}(2)$	Относительная погрешность $\Delta, \%$
0	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	
1	498550	500296	499693	500494	499139	0,14
2	249309	250225	250529	250091	249245	0,20
3	124885	124715	125342	125298	124505	0,28
4	62433	62292	62341	62914	62111	0,40
5	31326	31077	31084	31490	31324	0,57
6	15782	15623	15316	15711	15656	0,80
7	7888	7798	7759	7909	7871	1,13
8	3916	3947	3892	3914	3970	1,60
9	1935	1968	1926	1943	2034	2,26
10	950	973	951	944	1036	3,21

Анализируя результаты, делаем вывод 3: относительная погрешность исследований тем меньше, чем большее количество радиоактивных атомов исследуется.

Учитывая выводы 1, 2 и 3, можно утверждать: закон радиоактивного распада  $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$  имеет статистический характер, т. к. расхождение между теоретическими расчетами и экспериментальными результатами тем меньше, чем больше радиоактивных атомов (ядер) принимает участие в радиоактивном распаде.

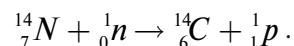
Применение закона радиоактивного распада в археологии

В 1948 году американский ученый Уиллард Франк Либби предложил метод хронологического маркирования археологических находок органического происхождения, основанный на применении закона радиоактивного распада (радиоуглеродный метод), за разработку которого в 1960 году был награжден Нобелевской премией по химии.

Идея метода основана на измерении остаточной радиоактивности найденного предмета органическо-

го происхождения и сравнении ее с некоторым стандартным значением.

Как известно, в процессе обмена веществ живой организм растения или животного усваивает из воздуха углекислый газ  $CO_2$ . Основная часть карбона, входящего в его состав —  $^{12}_6C$  (99%) и  $^{13}_6C$  ( $\approx 1\%$ ) — стабильные, и лишь  $10^{-10}\%$  — радиоактивный изотоп  $^{14}_6C$  с периодом полураспада 5600 лет. Он образуется в результате бомбардировки  $^{14}_7N$  нейтронами, которые появляются в атмосфере благодаря космическому излучению:



Этот радиоактивный карбон усваивается живым организмом вместе с основными стабильными его изотопами. Поскольку содержание  $^{14}_6C$  в атмосфере со временем не изменяется благодаря неизменной интенсивности космического излучения, то содержа-

ние  $^{14}_6C$  в живом организме также будет неизменным и независимым от исторической эпохи. Например, содержание радиоактивного карбона  $^{14}_6C$  в 1 г живой древесине сегодня точно такое же, как и 10 000 лет назад, какой обеспечивает приблизительно 15 распадов в 1 минуту. После гибели организма, когда его остатки не усваивают из атмосферы радиоактивный карбон  $^{14}_6C$ , его содержание в них непрерывно уменьшается согласно закону радиоактивного распада:  $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$ . Отсюда возраст археологической находки  $t = T \log_2 \frac{N_0}{N}$ .

Уменьшение интенсивности радиоизлучения единицы массы остатков организмов за счет радиоактивного  $^{14}_6C$  сравнительно с аналогичными предметами современной эпохи, пропорционального  $\frac{N_0}{N}$ , определяют экспериментально благодаря современным методам регистрации (счетчик Гейгера-Мюллера и др.).

Поэтому, если остаточная радиоактивность найденных археологами окаменелых деревянных останков составляет, например, 25 % излучения современной древесины, то возраст находки:

$$t = T \log_2 \frac{N_0}{N} = 5600 \log_2 \frac{1}{0,25} = 5600 \log_2 4 = 5600 \cdot 2 = 11200 \text{ (лет)}$$

Таким образом, в каждом живом организме есть как бы два вида часов. Одни — биологические, кото-

рые показывают возраст жизни. Они начинают идти с момента рождения организма и останавливаются в момент его смерти. «Стрелками» этих часов являются возрастные изменения в организме — годовые кольца деревьев, морщины на коже человека и общее старение организма. Вторые часы — радиоактивные, которые показывают, сколько лет назад наступила смерть. Эти часы не работают, пока организм живет. Они начинают отсчет времени с момента гибели организма и будут идти вечно. «Стрелками» этих часов является величина остаточной радиоактивности карбона  $^{14}_7\text{C}$ , входящего в состав останков органических веществ.

Метод Либби позволяет определить возраст предметов, пролежавших в земле от 1000 до 50 000 лет, с точностью до 100 лет. Результаты определения возраста египетских мумий и других предметов согласуются с достаточно надежными летописными данными.

#### IV. Обобщение изученного материала

##### 1. Решение задач

*Задача.* Каков период полураспада радиоактивного изотопа, если за сутки в среднем распадается 1750 атомов из 2000 атомов?

*Дано:*  $N_0 = 2000$ ,  $\Delta N = N_0 - N = 1750$ ,  $t = 1$  сутки.

*Найти:*  $T$  — ?

*Решение*

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}; N = N_0 - \Delta N = N_0 2^{-\frac{t}{T}};$$

$$1 - \frac{\Delta N}{N_0} = 2^{-\frac{t}{T}} = \frac{1}{2^{\frac{t}{T}}}; 2^{\frac{t}{T}} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta N}{N_0}};$$

$$\frac{t}{T} = \log_2 \frac{1}{1 - \frac{\Delta N}{N_0}}; T = \frac{t}{\log_2 \frac{1}{1 - \frac{\Delta N}{N_0}}};$$

$$T = \frac{1 \text{ суток}}{\log_2 \frac{1}{1 - \frac{1750}{2000}}} = \frac{1 \text{ суток}}{\log_2 \frac{1}{1 - 0,875}} =$$

$$= \frac{1 \text{ суток}}{\log_2 0,125} = \frac{1 \text{ суток}}{\log_2 8} = \frac{1 \text{ суток}}{3} = 8 \text{ часов}.$$

Ответ. 8 часов.

*Задача.* Период полураспада радиоактивного изотопа равняется 30 мин.

Через какой промежуток времени в образце массой 8 г останется 250 мг взятого данного изотопа?

*Дано:*  $T = 30$  мин,  $m_0 = 8$  г,  $m = 250$  мг = 0,250 г.

*Найти:*  $t$  — ?

*Решение*

Поскольку масса образца пропорциональна количеству его атомов, то закон радиоактивного распада  $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$  можно представить в виде:

$$m = m_0 2^{-\frac{t}{T}};$$

$$2^{\frac{t}{T}} = \frac{m_0}{m}; \frac{t}{T} = \log_2 \frac{m_0}{m}; t = T \log_2 \frac{m_0}{m};$$

$$t = 30 \cdot \log_2 \frac{8}{0,250} = 30 \cdot \log_2 32 = \\ = 30 \cdot 5 = 150 = 2,5 \text{ часа}.$$

Ответ. 2,5 часа.

##### 2. Фронтальный итоговый опрос, коррекция приобретенных знаний

1) Что называют периодом полураспада радиоактивного элемента?

2) Какой характер носит закон радиоактивного распада, какова его формула?

3) Пользуясь таблицей периодов полураспада, определите, за какое время масса  $^{59}_{26}\text{Fe}$  уменьшится:

а) в 2 раза; б) в 3 раза.

4) Пользуясь таблицей периодов полураспада, определите, как изменится интенсивность излучения  $^{11}_6\text{C}$  за час.

5) Почему невозможно спрогнозировать, в какой момент распадется тот или иной радиоактивный атом?

б) Каким методом определяют возраст археологических находок? В чем заключается суть метода?

#### V. Подведение итогов урока

#### VI. Домашнее задание

#### Литература

1. *Ехонович А. С.* Справочник по физике и технике. — М.: Просвещение, 1983.
2. *Широков Ю. М., Юдин Н. П.* Ядерная физика. — М.: Наука, 1980.
3. *Справочник по элементарной физике / под ред. В. А. Лободюка.* — К.: Наукова думка, 1975.