

作物 辐 射

遗传效应有关问题的基本原理

江苏里下河地区农业科学研究所情报资料室

一九八四年五月

目 录

第一、辐射遗传效应的物理学基本概念	1
一、各种辐射的物理特性	1
二、光化学反应与辐射化学反应的作用	6
三、电离及激发	7
第二、辐射遗传效应的水辐射离解和水溶液的辐射化学	18
一、水电离辐射 ^的 机理	18
二、水电离辐射各种初级产物的作用和特性	24
三、水电离辐射的初级产物对高分子的作用	28
四、水电离辐射的机理	32
第三、辐射遗传效应的染色体的诱发畸变	34
一、染色体的一般形态和结构	34
二、染色体畸变形成的假说	35
三、染色体结构的诱发畸变	36
四、染色体倍数性的诱发畸变	55
五、染色体畸变的生物 ^学 与物理学效应之间的关系	58
第四、辐射遗传效应的细胞质的诱发变异	64
一、细胞质遗传的特点	64
二、细胞质遗传的表现	65
三、细胞质遗传变异的成因	69
第五、辐射遗传效应的基因突变	71
一、基因突变的概念	71
二、基因突变的特性	72
三、基因突变的规律	74
第六、遗传物质畸变的机理	77
一、初级损伤与修复系统	77
二、损伤、修复和突变三者的关系	86
三、染色体畸变的现代分子学基础	87

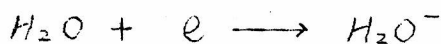
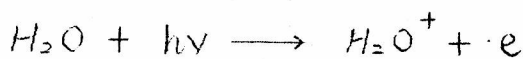
第一、辐射遗传效应的物理学基本概念

一、各种辐射的物理特性

电离射线除能引起物质的激发外，还能引起电离，具有更高的能量。电离射线通常分为两类：一类是粒子辐射，包括带电的和不带电的两种粒子，前者是指 α 粒子、 β 粒子和质子，后者是指中子；另一类是电磁辐射，包括 x 和 γ 两种射线，这一类射线在本质上与紫外线和可见光是一样的，都是以光子（光子）形式发射的，但它们的波长更短，能量也更大，比紫外线的量子能量大几百倍以上。

1. 带电粒子与物质的相互作用

在原子中电子几乎占据全部的体积，而核只占很少的体积，所以带电粒子基本上是与原子和分子中的电子相互作用，当带电粒子飞近原子的电子壳时，可以将原子或分子中的电子击出。原子或分子失去电子，则本身就成为带正电的阳离子，被击出电子又可被其他中性原子或分子所捕获，因而形成带负电的阴离子。以 H_2O 为例其方程式如下：



所有带电粒子在与分子中的电子相互作用时，都逐渐丧失能量，即就是说形成一个离子对，需要一定的能量。所谓一个离子对，以水电离为例，最初形成的 H_2O^+ 和电子称为一个离子对。不同物质的分子形成一个离子对所需的能量是不同的，一般来说需要几十个电子伏特（eV），如在空气中形成一个离子对需要32.5 eV的能量。由于形成一个离子对只需消耗极少的能量，而带电粒子却带有巨大的能量，所以它在射程中可以形成大量的离子对。带电粒子的电荷愈大，运动速度愈小，电离密度也就愈大。

(1) α 射线： α 射线是带正电的粒子束，质量比氢核（即质子）大约大4倍，质量比电子大7000倍。 α 粒子的射程：它的穿透力很弱，在空气中射程只有几厘米，而在组织中的射程只有几十个微米，所以一张厚的纸就可以对它进行防护了。 α 粒子电离能力很强，它在空气中1厘米行程上可以形成400,000个离子对，在动物体组织中

电离出度为每微米3000——4500离子对。也就是说， α 粒子在组织中的电离出度比在空气中大770倍，故 α 射线进入体内，会引起十分强烈的电离，导致机体的伤害。 α 粒子的能量是很高的，通常是2——8百万电子伏特(Mev)。

表1、各种能量的 α 粒子的电离密度

元 素	粒子能量 (Mev)	每1毫米行程 消耗的能量 (Kev)	在空气中的 电离出度 (离子对/毫米)
钋 210	5.3	90	2150
氦 272	5.5	88	2500
镭 A	5.95	82	2350

α 粒子在物质中的行程是直线的，所以由 α 粒子形成的离子是分布在以其行径为轴心的一个狭小的圆柱内，圆柱的直径大约是0.1微米。因而 α 射线造成损伤的范围是很小的，但在这个范围内所引起的损伤是严重的。

(2) β 射线(β ——粒子)： β 粒子带负电，就是通常称的阴电子，其质量约等于质子的 $1/1840$ ，是一种电子流。 β 射线的产生可以通过两个方面获得，第一，可以从加速器中产生，第二，可以从放射性同位素蜕变产生。

β 粒子的射程： β 粒子在物质中的射程比同样能量的 α 粒子的射程约大100——200倍， β 粒子在空气中的射程如具有2——3 Mev的 β 粒子其射程可达10——15米， β 粒子在水中与组织中射程是相似的，如具有1.7 Mev ^{32}P 的 β 粒子在组织中的射程可达8毫米。

表2、不同能量的 β 粒子在各种不同物质中的射程

能量 (Mev)	0.1	0.3	0.6	1.2	2.4	3.0
空气 (Cm)	13	80	200	500	1100	14500
水 (m.m)	0.11	0.7	1.7	4.3	9.6	12.5
铅 (m.m)	0.046	0.30	0.75	1.75	3.8	4.9

β 粒子的电离密度： β 粒子在其射程中所成的平均电离密度要比 α 粒子小得多， α 粒子在空气中1厘米射程内可形成几万对离子对，而 β 粒子只形成几十对离子对（50——100）。因而， β 射线比 α 射线电离密度小，穿透能力大。

β 粒子的能量：不同的同位素蜕变产生的 β 粒子其能量是不一样的，如 ^{32}P 蜕变产生的 β 粒子的能量为1.701 Mev， ^{35}S 蜕变产生 β 粒子的能量为0.167 Mev， ^{131}I 蜕变产生的 β 粒子的能量为0.605和0.25 Mev。总之 β 粒子的能量比 α 粒子要小。

表3. 各种能量的 β 粒子的电离密度

粒子能量	在水中的能量消耗 (Kev/ μ)	电离密度 (离子对/ μ)	水中的射程
0.1 Kev	33.23	1030	0.003 μ
1 Kev	13.33	380	0.05 μ
10 Kev	2.3	71	2.5 μ
100 Kev	0.12	13	141 μ
1 Mev	0.20	6.3	4.95 mm
2 Mev	0.20	6.3	16.3 mm

2. 不带电粒子的辐射

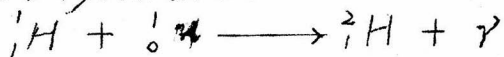
中子是一种不带电荷的质点，是由原子核反应时产生的。由于中子不带电荷所以它就不能与带电粒子在保持距离情况下相互作用，而只有当这些粒子直接发生相互碰撞时，中子才能将它的能量转移给它们。但必须指出：它们在相互碰撞时中子将能量不是转移给电子，而是转移给原子核。中子与物质的相互作用有四个途径：

第一，弹性碰撞：当中子与物质撞击时能从物质中打出一个核来，这个被打出的核称之为反冲核，它是带正电荷的，並以很大的速度前进，在前进的行径上能使与其相近的原子都发生电离。中子与原子相互撞击是遵守弹性碰撞原理，将其能量转移给原子核。所谓弹性球碰撞的原理：即当小球与一个质量很大的球相撞时小球只

失去一部份能量，如小球与质量相等的球碰撞时，则小球发生最大的能量丧失。根据这一原理，当中子与氢核相撞时，就会发生最大的能量丧失，因中子与质子质量相等，而与重核相撞时只失去一小部分能量，所以中子很易被水、石蜡等许多轻元素物质吸收，因而往往它们来减低中子的能量。

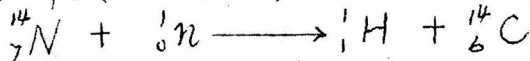
第二，非弹性碰撞：所谓非弹性碰撞即中子穿入核内，变出自己的一部分能量，使核处于激发状态。激发了的核把从中子获得的能量以一个或若干个 γ 量子的形式发射出来，随后进入核内的中子就带着较小的能量从核里飞出来。这种反应通常是快中子撞击在重元素时而产生，一般以 (n, n') 表示。

第三，辐射俘获：在撞击时，中子被核所吸收，被击发了的核以 γ 量子的形式放出多余的能量。

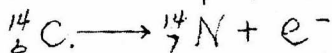


第四，核反应：当快中子（高能量）撞击到轻元素上还可以发生一系列不同的核反应的能力，如 (n, p) 等。

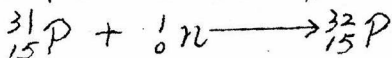
例一，当氮核捕获中子时可释放出质子和不稳定的放射性碳核。



${}^{14}_6\text{C}$ 通过释放 β 射线而又形成稳定的氮核。

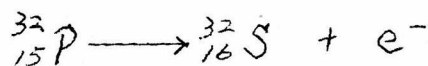


例二，当磷与中子相撞时可以形成放射性的磷。



${}^{32}_{15}\text{P}$ 则可通过释放 β 射线而相应的转变为稳定元素

${}^{32}_{16}\text{S}$ 。



3. 电磁辐射（ γ 射线与 x 射线）

γ 射线是硬电磁辐射的光子流（或量子流）， x 射线也是电磁辐射，它们与可见光、紫外光以及无线电波的性质相同，只是波长较短。都是以光速前进，由于不带电，在通过电场和磁场不发生偏

转。

为了要理解电磁辐射与原子间的能量交换，所以往往将 γ 射线与 x 射线看成质点或粒子，这种质点就叫做光子（或光量子、量子）。

一个量子的能量可按下式表示：

$$E(\text{量子能量}) = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

式中 ν 是辐射的频率， c 是光速， λ 为波长， h 为普朗克常数（ 6.6252×10^{-27} 尔格·秒）。

γ 量子的射程： γ 量子波长很短，穿透力很大，在空气中的 γ 量子的行程可以达几米，在金属中的行程也可达几十厘米。

γ 量子的电离： γ 量子的光速为 3×10^{10} 厘米/秒，具有很大的能量，但由于不带电，因而它的直接电离效应极差，只有当 γ 量子与原子或分子相撞时， γ 量子才能将其能量转移给从原子中被打出的电子，其能量几乎全部被击出的电子所吸收，因而被 γ 量子从原子中击出的电子一般都具有很高的能量，足够它通过的原子中产生电离。这些电子称为次级电子，次级电子在其行径上则产生电离效应，一个原子在吸收一个 γ 量子时便丢失一个电子。

γ 量子的电离效应可以说全部都是由次级电子产生的。 γ 量子的电离密度与等量的 β 射线与 α 射线相比小得多，它们之间的电离密度比例是 $\alpha : \beta : \gamma = 10000 : 100 : 1$ 。

表4. 具有相同能量的 α 、 β 、 γ 的电离情况

具有 2 Mev 能量 的 射 线	在空气中的射程 (米)	在 1 毫米行程上 形成的离子对
α 粒 子	0.01	6000
β 粒 子	1	60
γ 量 子	100	0.6

γ 射线与 x 射线之间并无特殊差别，一般讲 γ 射线比 x 射线的波长更短，能量更高但它们之间并无一定的界线。就其辐射来源讲， γ 射线是原子核蜕变产生，而 x 射线则是来自原子核外的电磁辐射。

x 、 γ 量子与物质相互作用时，实际上物质吸收其能量有三种方式：

第一，光电效应：如果 γ 量子的能量很小，当其撞击原子时，就将原子壳层轨道的电子打击出来，而与此同时将其自身的能量都转移给电子，这种作用称之为光电效应。光电子产生后， γ 量子也不再存在，因其质量和能量都全部转移与其碰撞的系统。

第二，康普顿效应。具有相当大能量的 γ 量子与物质相互作用时就可看到这种方式，但它与光电效应不同，首先打击出来的电子是有一定方向的，此为反冲电子，其次反冲电子一般比光电子能量要高得多，最后， γ 量子在撞击后仍以较小的能量继续运动。

第三，电子——电子偶的产生：如果 γ 量子具有很高能量（大于 1.02 Mev ）当其原子核相互作用时，就会发生光量子，自身转化为一个正电子与一个负电子，这称为电子偶的产生，其能量每个粒子至少有 0.51 Mev 。

二、光化学反应与辐射化学反应的作用

由能量引起生物的化学反应，根据其得到的能量可概括为两种

第一种，普通的化学反应，或称做“热”化学反应。当热能和大到生物体所需要的能量时，就会自发地发生反应。此反应在一定适宜的温度范围内是随温度的增加而增强。其反应的能量是靠热能供给的，而分子活化能是从普通分子中获得的热能。

第二种，是指系统中发生的化学反应，当生物体有一小部分的分子，当其能量超过系统的平均能量时就会发生反应，其反应速度是靠系统中的组成分子不断获得更高的能量而实现的。引起这种反应的能量是辐射能，不同的辐射能流发生不同的化学反应，主要的是：

1, 光化学反应: 以日光为辐射能源产生的反应, 称之为光化学反应。

2, 辐射化学反应: 由 γ 、 x 、 α 、 n (质子)和 e (电子)等辐射能源引起的化学反应称为辐射化学反应。

光化学反应和辐射化学反应, 两者有相同和不同的特点:

(1) 相同点: 两种反应的产生都是由辐射与受辐射物质的电子系统相互作用的结果。

(2) 不同点: 首先光化学通常由可见光与紫外光所产生的反应, 其辐射能源具有较长的波长和较小的能量; 辐射化学反应是由高能辐射所产生的, 其辐射能源具有较高的能量和较短的波长。其次, 光化学反应只引起分子或原子的激发, 而辐射化学反应则不仅引起激发, 更重要的还能引起电离; 再次, 由于电离作用因而产生了离子和自由基, 它们在溶液中并不是杂乱无章的, 而是沿着射线作有规律分布的, 但紫外线所产生的自由基则不是如此; 最后, 在辐射化学反应中能量的丧失是逐渐的, 而在光学反应中每一个量子被一个单独分子所吸收。

3, 光化学反应与辐射化学反应的过程

(1) 光化学反应的过程通常包括两个步骤, 即光化学激发反应, 当原子和分子吸收光能产生的激发作用, 一般这一步骤是与温度无关的; 次级反应, 则是热反应的过程, 其包括激发分子与由激发分子产生的自由基与其它物质分子相互作用的过程。

总之, 光化学反应是激发的分子(或原子)与非激发原子(或分子)间的反应和早期形成的自由基与正常分子间反应的综合。

(2) 辐射化学的激发反应, 当物质吸收高能辐射后, 产生了许多不同状态的激发和电离的原子或分子, 这是辐射化学基本的激发反应, 但其激发反应过程还是复杂的, 大多数产物不是直接由辐射产生而是由激发辐射产生的次级或更次级辐射产生的。

三、电离及激发

电离辐射的生物学效应是一个复杂的过程, 它通过两种作用机

制引起的，一是直接作用又称元发作用，即由电子或其它原子微粒穿过被作用的分子，因而直接引起了分子本身的变化，使它电离或激发；二是间接作用又称继发作用，即这时被作用的分子并不吸收能量而是通过能量传递，自另一个分子间接获得所需的能量。

但在实际应用中有的是把储存在物质分子内部或附近的能量引起的钝化当作“直接”作用，而把“间接”作用限于由水形成的扩散中的自由基所引起的反应，即就是在水溶液体系中的间接作用，全部是由水中形成自由基所引起的，因为电离的水分子在分解成自由基以前的寿命只有 10^{-11} 秒，要在这样短的时间内和具较低电离电势物质分子进行电离交换作用，其机率几乎接近于零，所以认为在直接作用下对有机分子产生的激发作用能否引起化学变化是很可疑的。

电离辐射引起的激发、电离是直接作用的元初结果，因而这两种元初过程常常同时发生，但也有不同时发生，只有一种作用，如紫外光可以使分子激发，而不能使其电离。一般的电离辐射不适合于把激发和电离分别研究。为了更好的说明电离及激发的效果起见，故把这两方面分开叙述：

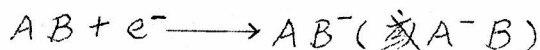
1、电离：电离辐射使物质发生了电离作用，其结果产生一个正离子与一个电子组成的离子对，以水为例是： $H_2O \longrightarrow H_2O^+ + e$ ， H_2O^+ 自由基团离子或自由基都具有奇数电子很不稳定，极易起反应。进一步可以离解形成自由基 $OH^\cdot$ ，即 $H_2O^+ \longrightarrow OH^\cdot + H^+$ 。电离作用产生的离子和电子，它们与物质的相互作用，产生的次级反映，归纳起来有如下反映：

(1) 阴离子的形成

分子的原子射出电子后，其分子成为一个阳离子，而这个电子引起了一系列的电离，直到它的能量消耗到仅有几个电子伏为止，这时它的命运有两个：一是被其它分子所捕获产生一个阴离子；二是被原来的阳离子重新捕获。

电子被中性分子捕获后可形成阴离子，同时也可以伴随产生稳

定的负分子，其方程式表示如下：



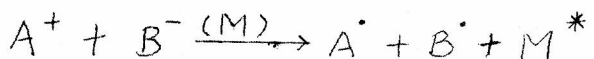
上述反应的发生是由键与环境因素决定的，如 H_2O^- 在气相中是稳定的，但在液体的水中就极易离解。

(2) 电荷的中和作用

如果没有一个原子能与电子结合，那么正离子就可以捕获一个电子，并立即离解，可能形成的产物，是两个自由基，其中一个处于激发态，其方程式如下：



带正电与带负电的自由离子，只能在第三个分子存在下，由于碰撞的结果，可能的反应是离子解离为两个自由基，同时激发第三个分子 (M)，通常它的活性比自由基要小。

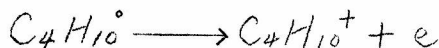


(3) 电荷转移 当一个分子的电荷小于另一个分子的电荷时，则可能进行电荷转移，即电荷由高的向低的方向传递。在这个过程中，根据 Magee 结论：他认为可能进行电荷转移的两个分子，呆在一起可达一秒钟之久。由于有足够长的化学反应时间，因而在这一中间时期，其它分子也可能与电荷转移的分子暂时结合，产生一些复杂的反应



(4) 离子的离解：

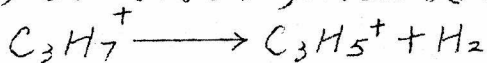
自由基离子是不稳定的，它会产生许多不同的自动离解，在气体中，以 C_4H_{10} 为例



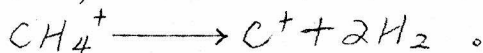
而 $C_4H_{10}^+$ 的离解，可以从两个方面进一步反应：

(A) $C_4H_{10}^+ \longrightarrow CH_3^+ + C_3H_7^+$ 。即分解一个自由基和一个阳碳离子。后者虽不是自由基，但也很不稳定，一般经继续反应排

出氢气同时产生一个离子，形成了双键使它稳定：

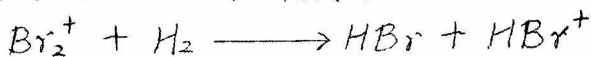


(B) $C_4H_{10}^+ \longrightarrow CH_4 + C_3H_6^+$ ，这种反应形成了一个稳定分子与一个不饱和的自由基离子，但 CH_4 据报导也会产生完全裂解： $CH_4 \longrightarrow CH_4^+ + e^-$ ；



(5) 离子与中性分子的反应：

离子与一个中性分子间亦可产生反应，这种反应由电离辐射导致的化学变化在有机系统中颇为重要如：



2. 激发：

原子或分子中电子层的一个内层电子由于受到外界能量的打击（如可见光和紫外光的光子）没有从原子中打击出一个电子来，仅仅提高电子的能级，这个作用称为激发作用，原子或分子处于这一状态，则称之为激发状态。关于高能辐射产生的激发机制还了解得很少，目前对它的一些解释，仍然是运用光化学上的一些知识。当光能被分子吸收以后，其结果必将辐射能转变为分子的内部运动能，分子的内部运动能有三个方面：即整个分子的旋转能；原子核之间的振动能和电子运动能（激发能）。当一个分子处在基态时，就是指以上三种内能的数值都处在最小值，分子从基态转变为激发的这一过程的吸收能量，等于激发时的总内能与基态时的总内能之差（见图一）。

旋转能、振动能和电子运动能的三种能级距离差别是很大的。一是，电子运动的能级距离最大，一般在 $1 \sim 20 \text{ eV}$ 之间（ $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-12} \text{ 尔格/电子}$ ，即相当于 $12800 \text{ \AA}$ ）；二是，振动能级的距离次之，一般在 $0.05 \sim 1 \text{ eV}$ 之间；三是，旋转能级的距离最

小，一般在 0.05 eV 以下。当一分子处在激发状态时，主要表现在电子能级的提高上，所以往往有人称激发为‘电子激发’。

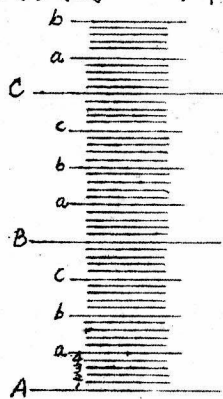


图1 注解：A表示分子的基态，B-D为分子的第一-第三激发态，以下如此类推，B与A之间的距离代表分子由基态转变成第一激发态时电子能级的升高，图中a、b、c……等表示分子中原子核之间的振动能级，1、2、3、4……等则表示分子的旋转能级。

图 1

激发的分子由于增高了内能，所以是处在不稳定状态，而增高的内能在分子中是不会停留多久，总是通过一些途径消失掉，多余能量消失的途径有很多方面，但从激发状态方面看主要有下列几个方面：

(1) 荧光与磷光：

荧光：分子的激发能消失最简单的形式就是发射光。如分子吸收能量后，在小于 10^{-6} —— 10^{-9} 秒钟内就发出光能时，此光称为荧光。所有的荧光都是从激发态的最低振动水平中发生的，即就是从第一激发态到基态过程发生的。为什么荧光要在上述过程中发生呢？因为在激发最低振动水平时，原子核之间的距离基本与基态时相近或相等，如在较高的电子状态下，多余的振动能就以热能的形式通过分子间相互碰撞的内部转换过程进行消失。

磷光：许多有机物分子，特别是那些高度共轭结构的分子，当通过解于正常基态与第一激发态能量之间时，其电子所处状态称为间稳状态，这时分子吸收能量后，在 10^{-6} 秒以上发射出的光能为之磷光。

磷光态的主要性质比荧光态较稳定，寿命较长，其所释放的波长更接近于能为生物系统所利用的能量。但处在间稳状态发射磷

光的本质是什么？

从图2表示是由F到F'内部转换过程之一，在这个过程中，电子释放多余的能量，是以热能的形式消失能量，不是通过放射光子而降到较低的能量水平。此过程称为无辐射的放热过程。

当电子由简单地升到较高能量水平，然后又返回原来的水平称之为单线激发，但有时也会有很小的机会，激发电子会改变与原来相反的旋转方向，这样就使其与共同伴具有平行方向自旋，这种状态称之为三线激发。三线激发一般的概念就是所谓间态激发态这时很少的。单线到三线激发态时是从图2中的F到M，即5的过程。这个过程在高压下会放射磷光的，因为

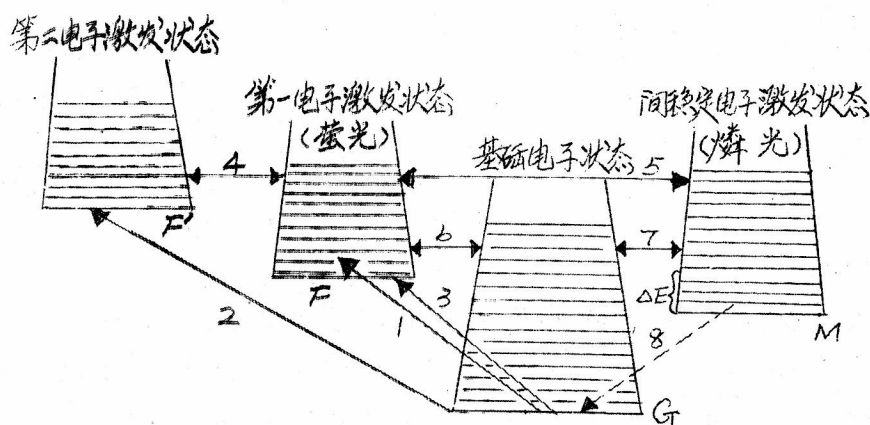


图 2

当电子由单线激发态下掉到三线激发态M时也放出一部分能量，但后者M的能量总是低于前者下的能量水平，而两者之差是不大的，则在加温的情况下，电子可以从M通过5回到F，而放射磷光的过程。但也有比较多的可能，不放射出磷光，其多余能量的消失，是分子在M激发态时与其它分子碰撞逐步消失其能量，这个过程就是M到G过程7。

在M状态下的电子还可直接降到原来基态水平的可能，同时放射磷光，即由三线激发态到基态（或基态单线水平）放射出磷光

這就是從M到G過程8，這個過程雖然是有困難的，但其它過程不可能的話，過程8也是可以發生的。這個過程主要隨溫度而增加。

總之，熾光與螢光是不同的兩種激發態的量子發射過程，螢光是從第一激發態到基態的轉變，而熾光是從間穩態到基態的轉變，這是很少發生的，但畢竟是可能的。熾光發射與間穩態有關，因而也與溫度有關，溫度升高有利於高溫熾光的發射，溫度愈低熾光發射的可能性和重要性也愈大。間穩狀態在目前情況下是被看做為三線激發狀態。

(2) 化學反應：

激發分子中的電子吸收的能量若轉移到一個特別鍵上發生斷裂，這種斷裂稱為離解。離解有幾種：一是光離解，上述情況下離解的為光離解，它可以產生一個普通原子，一個激發原子；二是預離解又叫超前離解，有時電子激發狀態的穩定振動能級會重迭於另一激發狀態的離解區域，這時電子從一個穩定激發態落入另一個不穩定的激發態，因而發生離解，此離解稱為預離解，預離解的結果最初產物為自由基，但有時也可產生穩定的分子。

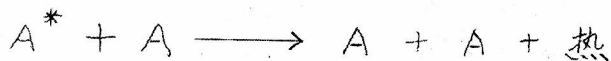
(3) 內部轉換過程：

激發分子吸收的能量一方面可以用發射光量子的簡單形式，即螢光與熾光消耗其能量，另一方面也可以用熱能形式通過內部轉換過程進行消耗，所有內部轉換過程的特點都是從較高的電子激發狀態的較低振動能級向較低的電子激發狀態的較高振動能級轉移。由於這樣的結果增加了振動能，導致了“熱分子”的形成，即增加其原子核的動能。因而可以使分子重排，也可使鍵斷裂，這一點在生物學上是很重要的，在人工誘變方面起着積極的作用。

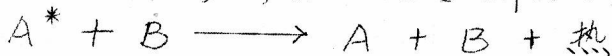
(4) 分子間的碰撞作用：

分子間的碰撞作用是指激發分子與非激發分子相互碰撞作用，它們兩者作用的結果就使螢光熄滅和產生熱能，因而激發分子的能量，也可以熱能的形式通過分子間的碰撞作用進行消耗。螢光的熄滅和熱能的產生可以發生在不同情況下：

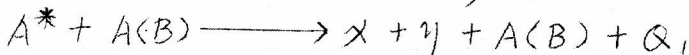
第一种，聚集萤光熄灭，这是指同一分子间的碰撞，其反应式是：



第二种，混合物的熄灭，这是指异分子间的碰撞，其反应式是：



上述两种碰撞有人提出也可以形成自由基，其反应式是：

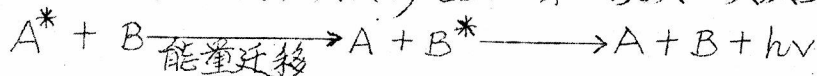


激发分子形成的自由基(X、Y)又进行重组的反馈过程时释放出能量 Q_2 ，其反应式是：



(5) 电磁耦合作用：

激发分子的能量丧失的另一途径即就是也可以靠激发分子与非激发分子在空间的电磁作用而发生能量的丧失。这一作用的典型例子就是敏化的荧光现象。发生荧光现象要有两个条件，一是两个分子间的距离大于其碰撞距离，但又不需太大，以致不能依靠碰撞发生耦合；二是激发分子的发射光谱必需重叠于接收体的吸收光谱。在上述两个条件下，所谓敏化荧光现象，就是一个物质吸收量子，而另一物质产生荧光，即就是说，在两物质没有通过碰撞的情况下，由一吸收能量的物质转移能量给第二物质，其反应式是：



(6) 电子的传递：

通过电子的传递是激发分子消耗其能量第六个途径，这一现象主要发生在结晶体上，晶体内存存在着两个能带，即填满电子的下面满带(A)和未填满电子的上面空带或导带(B)，据量子力学，由下面满带过渡到上面空带能够激发电子，但上面空带过渡到下面的满带而发生辐射是不可能的，如图3所示，当吸收光量子时，一个电子就可由满带转移空带上而在空带上传导，但电子在传导时，可能在晶体的某一点，掉入陷阱，释放一部份能量，但也会降落到满带

上而发射光出来。

根据能带论，导电体两个能带是相连接的，所以它的导电性很强；绝缘体的两个能带距离很大，所以不能导电；半导体的两个能带之间的距离不是太大，因而在增加热能时就可使其电子发生传递而生物体组织内的许多构成物质是具有半导体性质的，如叶绿体、蛋白质、纤维蛋白质和血浆蛋白是具有半导体性质的，因而有利于了解辐射能量在生物体中的传递过程。

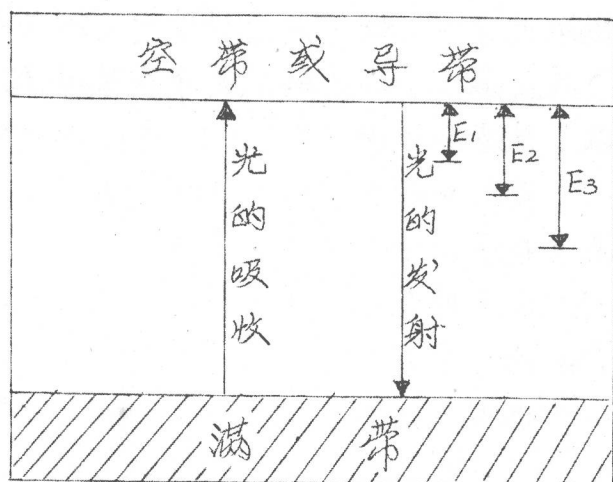


图3. 电子传导的能带论图解

总之激发分子消耗其吸收能量归纳起来可以通过四个途径进行：一是借释放光子的途径即发射荧光和磷光的途径来释放；二是借内部转换过程，将电子激发能转变成组成分子中的原子核振动能，进而产生化学变化；三是激发分子可借碰撞而将能量转移给碰撞的分子并释放热能而导致荧光熄灭；四是激发分子也可借不直接的碰撞而靠电磁的耦合作用转移其能量，而导致另一分子的荧光发射。上述四个方面都是激发分子能量转移的进一步形式，其结果必然在放射生物学效应中起着重要作用。

四、电离、激发的原子与分子的能量转换

关于它们之间的能量转变关系，我们以物理和化学两方面来叙述放射生物学的效应。为了便于说明提出下面示意图4用来叙述水