

# 第八章

# 基因表达调控



# 第一节 概述



## 一、基因表达是指基因转录及翻译的过程

### ➤ 基因组(genome)

来自一个生物体的一整套遗传物质。

### ➤ 基因表达(gene expression)

是基因转录及翻译的过程，即：生成具有生物学功能产物的过程。

### ➤ 基因表达是受调控的。

## 二、基因表达具有时间特异性和空间特异性



### (一) 时间特异性

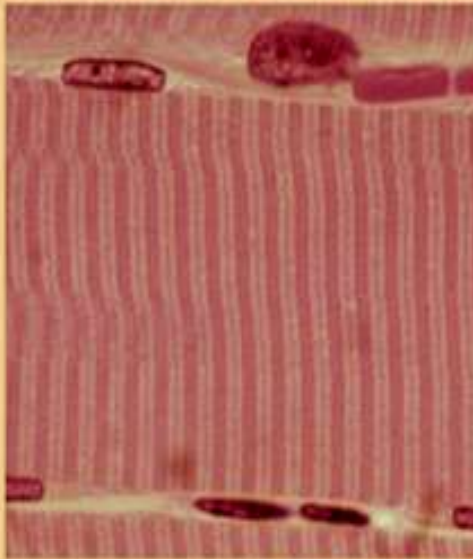
- 按功能需要，某一特定基因的表达严格按特定的时间顺序发生，称之为基因表达的**时间特异性 (temporal specificity)**。
- 多细胞生物基因表达的时间特异性又称**阶段特异性 (stage specificity)**。



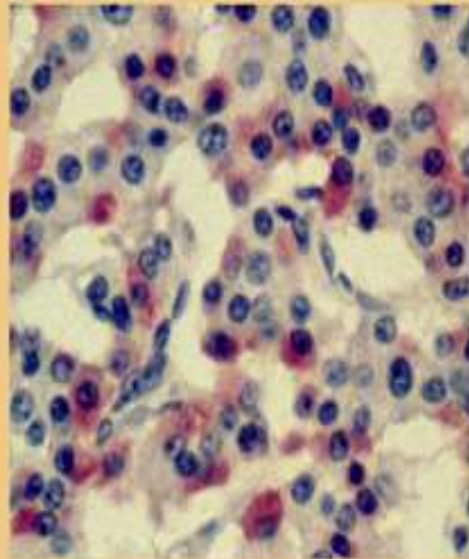
## (二) 空间特异性

- ▶ 在个体生长全过程，某种基因产物在个体按不同组织空间顺序出现，称之为基因表达的**空间特异性 (spatial specificity)**。
- ▶ 基因表达伴随时间顺序所表现出的这种分布差异，实际上是由细胞在器官的分布决定的，所以空间特异性又称**细胞或组织特异性 (cell or tissue specificity)**。

# PATTERNS OF GENE EXPRESSION IN FIVE TYPES OF CELLS

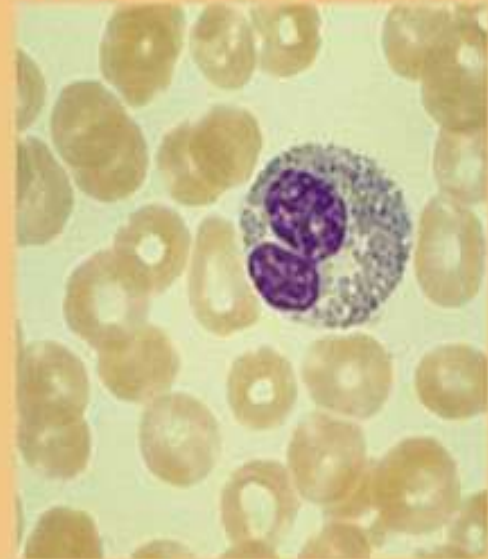


**Muscle Cell**



**Pancreas Cells**

Alpha Cells      Beta Cells



**Blood Cells**

White Cells      Red Cells  
(Immature)

## Genes for...

Glycolysis enzymes	On	On	On	On	On
Muscle contraction proteins	On	Off	Off	Off	Off
Glucagon	Off	On	Off	Off	Off
Insulin	Off	Off	On	Off	Off
Hemoglobin	Off	Off	Off	Off	On

### 三、基因表达的方式及调节存在很大差异



按对刺激的反应性，基因表达的方式分为：

- 基本（或组成型）表达
- 适应性表达
- 协调表达





## (一) 组成型表达方式

- 某些基因在一个个体的几乎所有细胞中持续表达，通常被称为**管家基因 (housekeeping gene)**。
- 无论表达水平高低，管家基因较少受环境因素影响，而是在个体各个生长阶段的大多数或几乎全部组织中持续表达，或变化很小。区别于其他基因，这类基因表达被视为**组成型基因表达 (constitutive gene expression)**。



## (二) 适应性表达方式

- 在特定环境信号刺激下，相应的基因被激活，基因表达产物增加，这种基因称为**可诱导基因(inducible gene)**。可诱导基因在特定环境中表达增强的过程，称为**诱导(induction)**。
- 如果基因对环境信号应答是被抑制，这种基因是**可阻遏基因(repressible gene)**。可阻遏基因表达产物水平降低的过程称为**阻遏(repression)**。





### (三) 协调表达方式

- 在一定机制控制下，功能上相关的一组基因，无论其为何种表达方式，均需协调一致、共同表达，即为**协调表达(coordinate expression)**，这种调节称为**协调调节(coordinate regulation)**。

## 四、基因表达调控为生物体生长、发育所必需



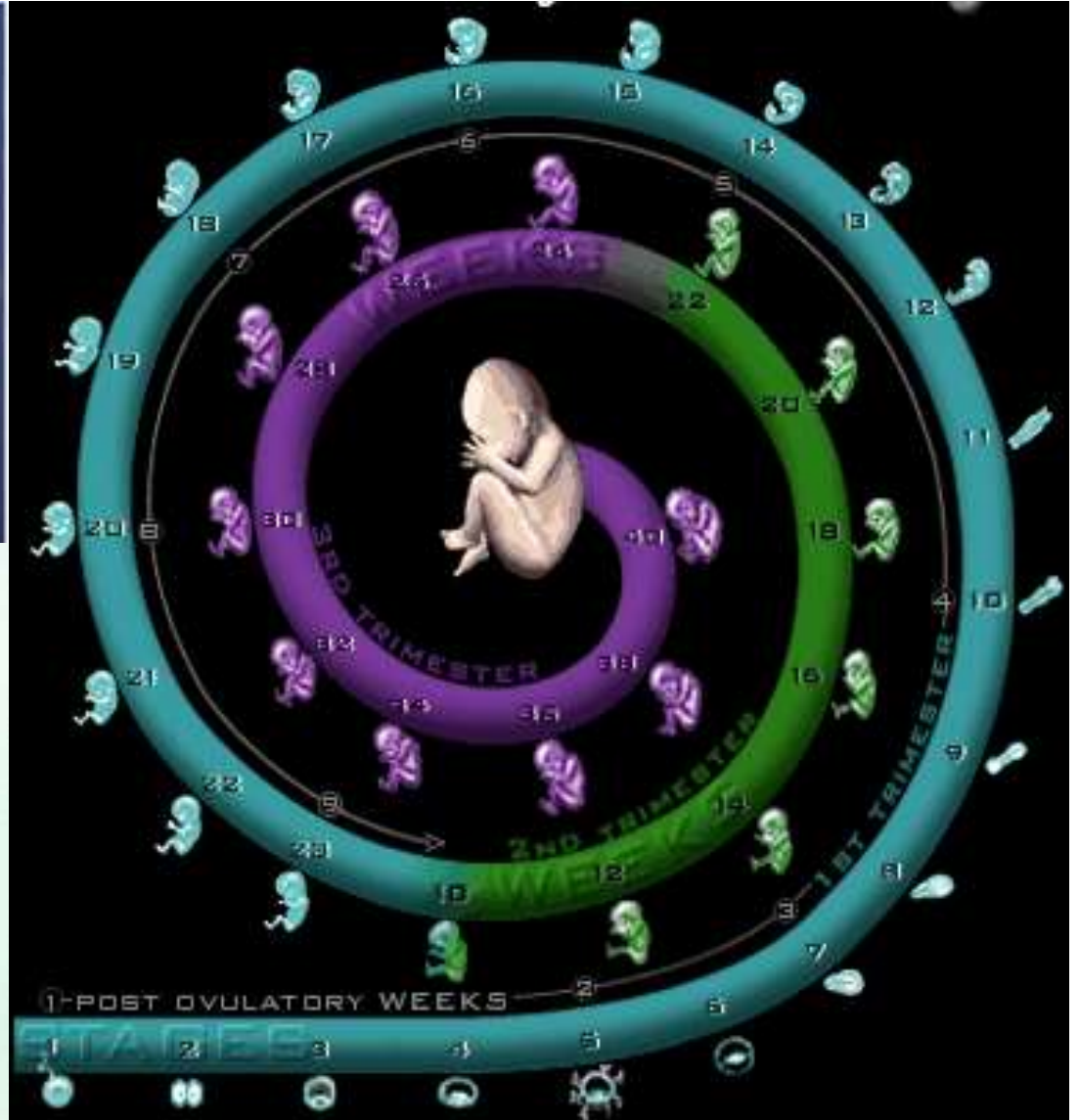
### (一) 适应环境、维持生长和增殖

生物体所处的内、外环境是在不断变化的。通过一定的程序调控基因的表达，可使生物体表达出合适的蛋白质分子，以便更好地适应环境，维持其生长和增殖。



## (二) 维持细胞分化与个体发育

在多细胞个体生长、发育的不同阶段，或同一生长发育阶段，不同组织器官内蛋白质分子分布、种类和含量存在很大差异，这些差异是调节细胞表型的关键。



# 第二节 原核生物 基因表达调控

Regulation of Gene Expression in Prokaryotes



# 主要内容:

- ❖ 原核生物基因表达特点
- ❖ 细菌的基因表达调控
- ❖ **Lambda** 噬菌体的基因表达调控
- ❖ 原核生物翻译水平的基因表达调控



# 原核生物基因表达特点

Characteristics of Gene  
Expression of Prokaryotes





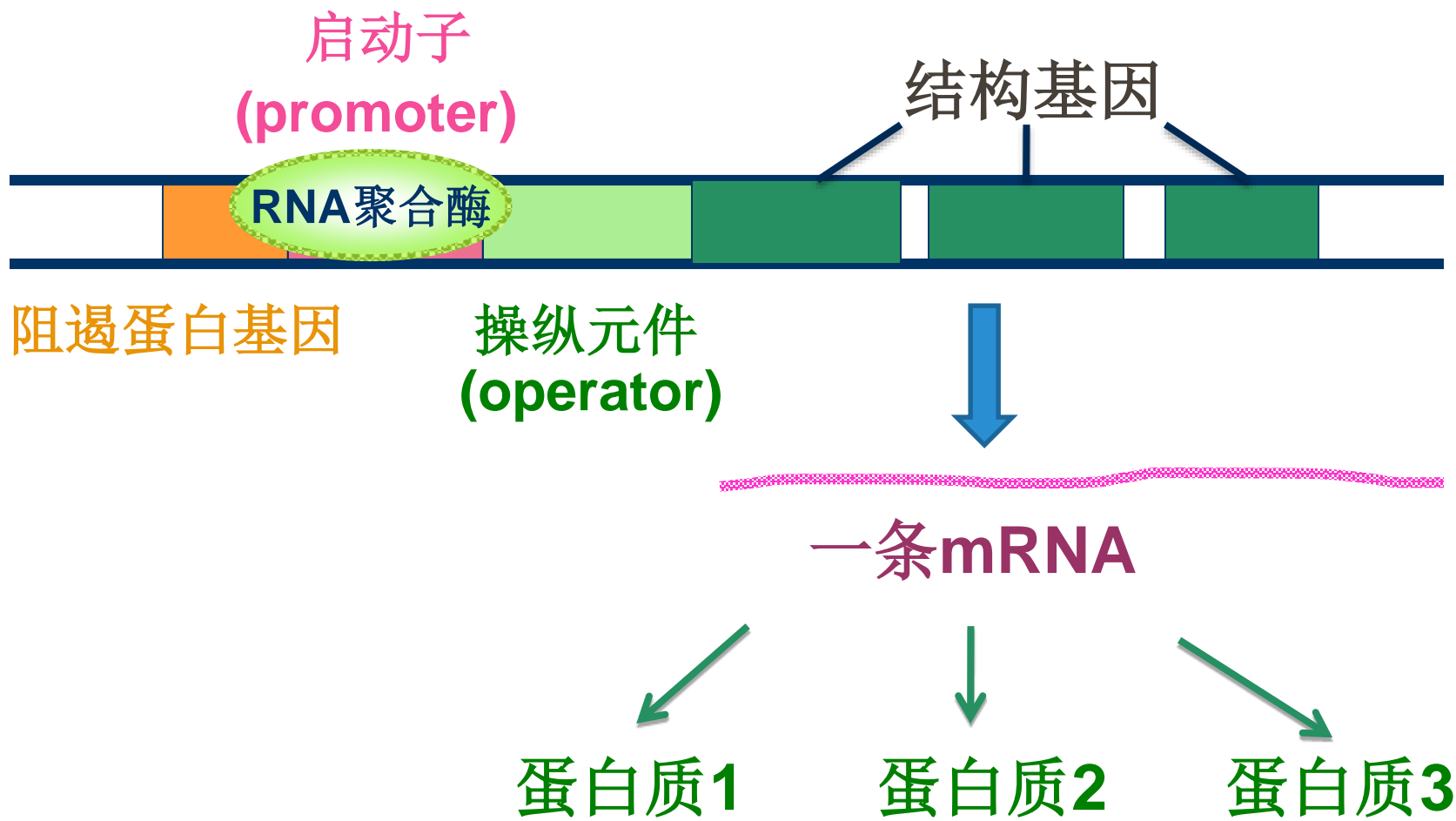
# 一、操纵子是原核生物的基因转录单元



原核生物绝大多数基因按功能相关性成簇地串联、密集于染色体上，共同组成一个转录单位——**操纵子**。

**操纵子(operon)**是由**结构基因**及其上游**调控序列**组成的转录单元，结构基因转录受调控序列控制。

**调控序列**包括阻遏蛋白(**repressor**)基因*I*，近端的启动子(**promoter, P**)和操纵元件(**operator, O**)。



## 二、mRNA所携带的信息差别很大

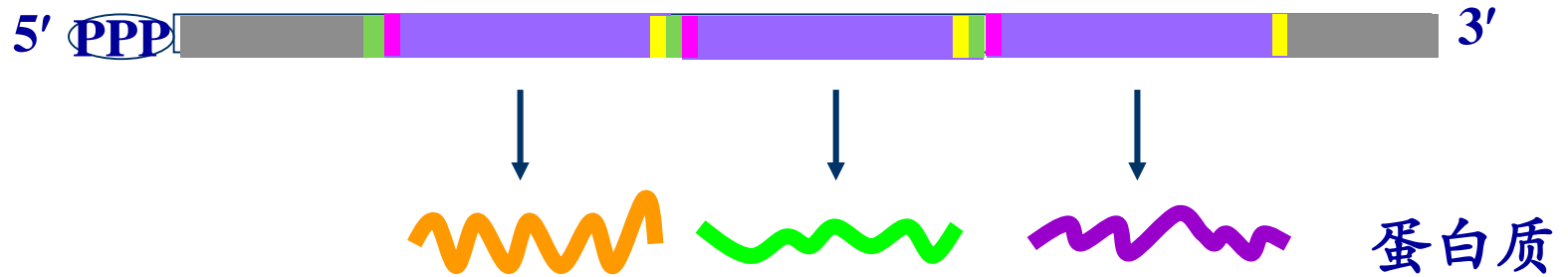


细菌mRNA所编码的蛋白质数量有很大差异。有的mRNA只带有一个结构基因的信息（编码一个蛋白质），称为单顺反子mRNA（monocistronic mRNA）。

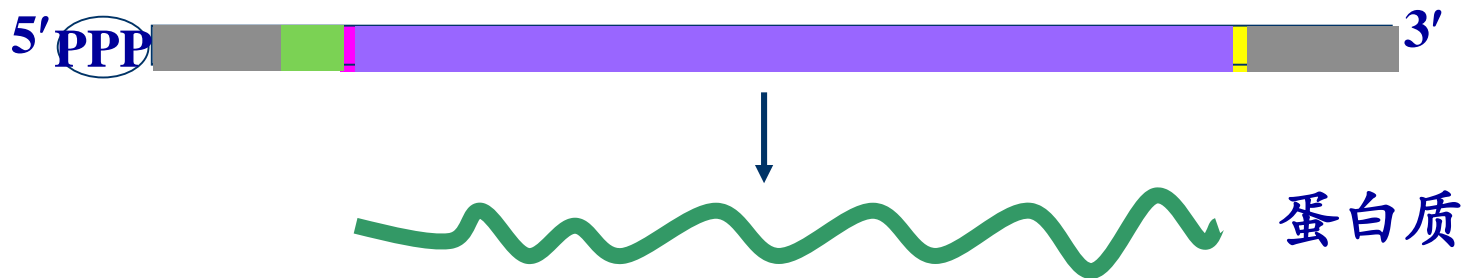
大部分mRNA都是从操纵子转录而成，带有编码几个甚至十几个蛋白质的序列信息，这种mRNA是从几个首尾相连的结构基因（存在于一个操纵子中）一次转录而成，称为多顺反子mRNA（polycistronic mRNA）。



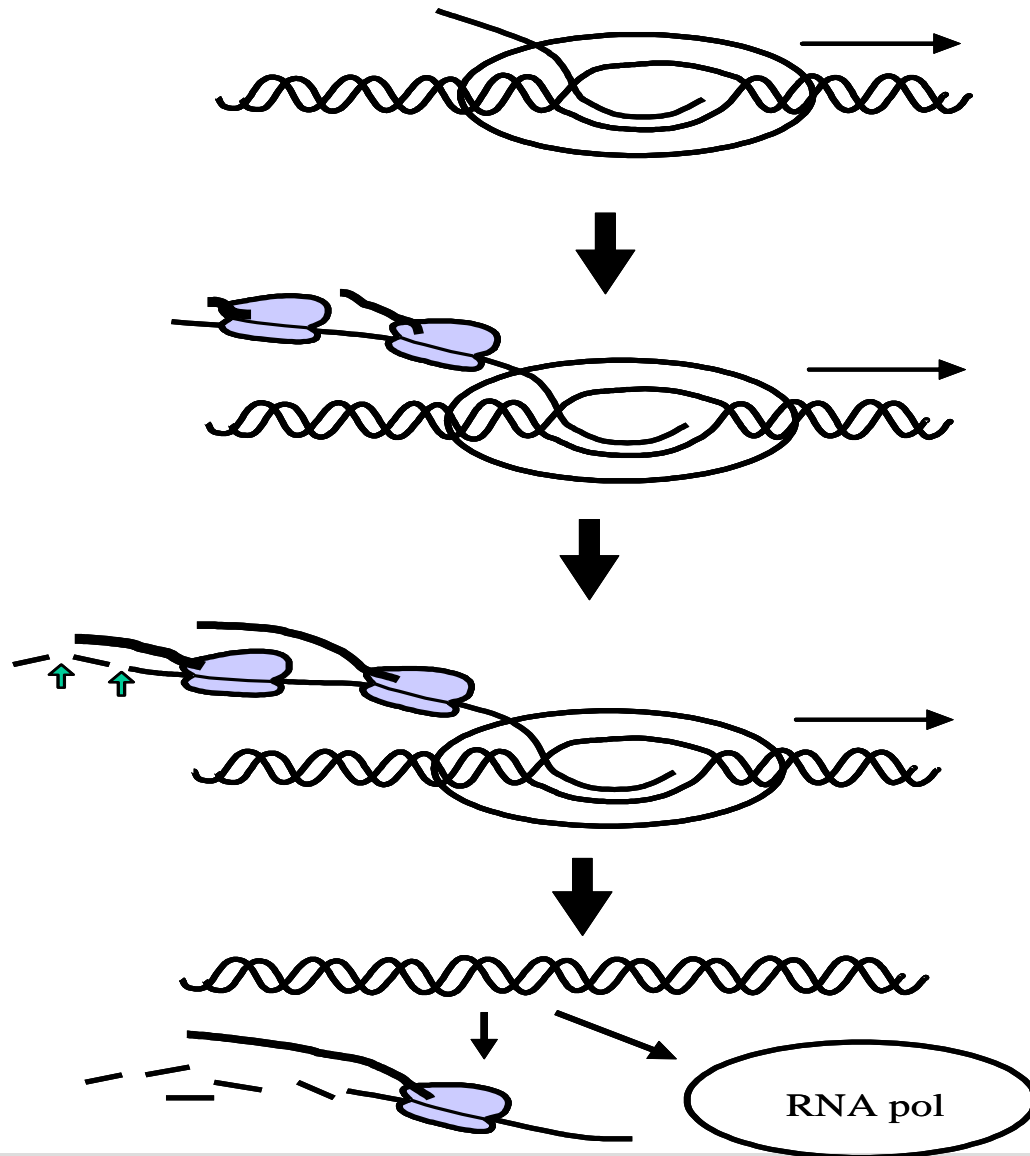
## 多顺反子mRNA



## 单顺反子mRNA



### 三、原核生物中mRNA的转录、翻译和降解偶联进行

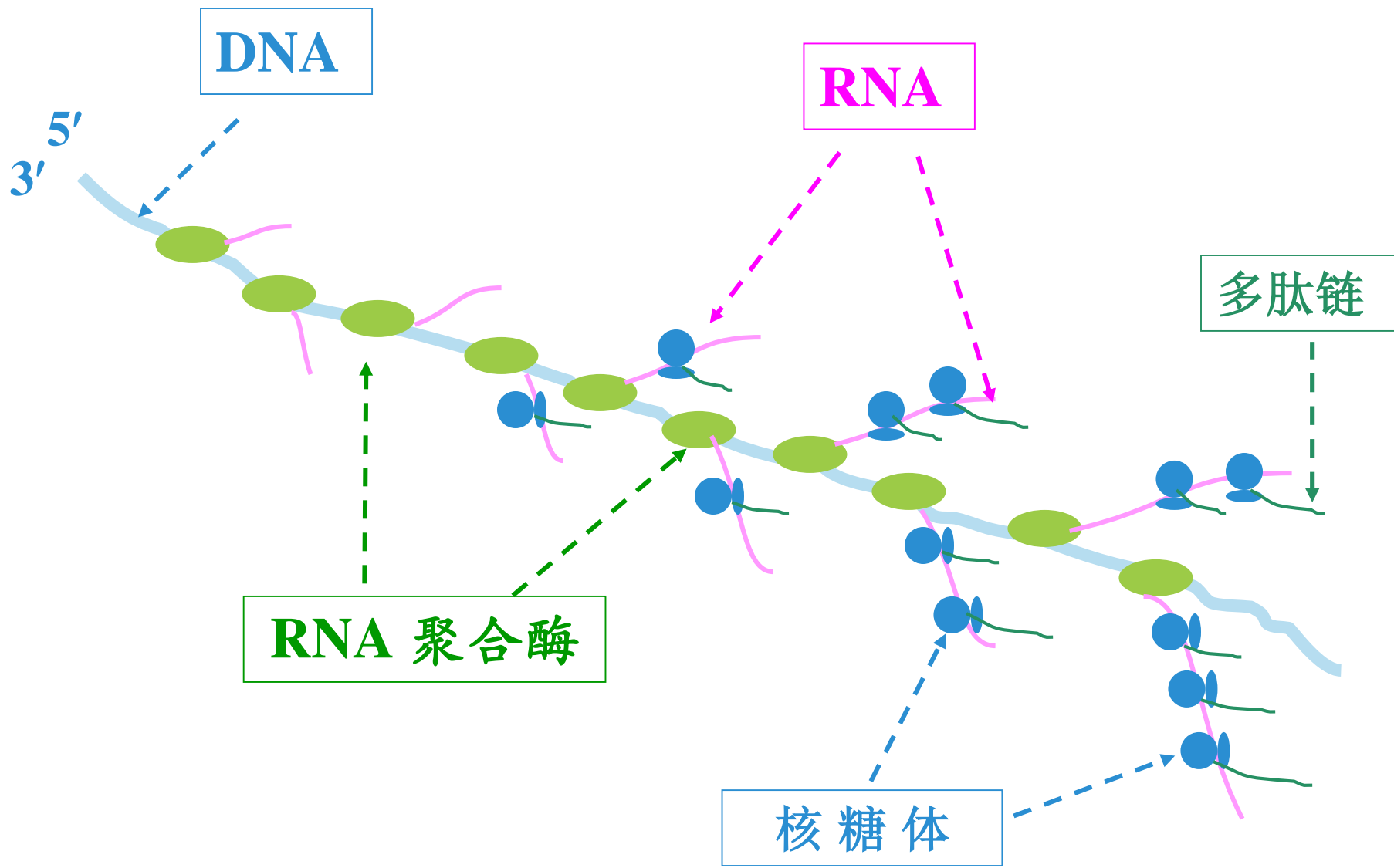


开始转录

继续转录，同时，  
核糖体结合mRNA  
进行翻译

RNA 5'端开始降解

转录终止，继续  
翻译和降解



DNA

RNA

多肽链

RNA 聚合酶

核糖体

# 细菌的 基因表达调控



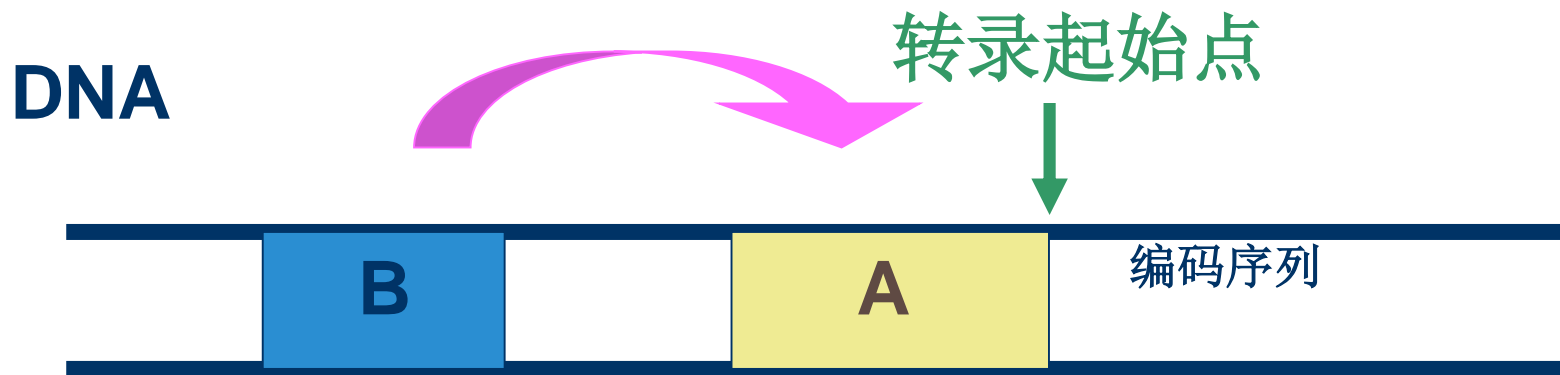


# 一、基因表达调控的分子基础



特定的**DNA**序列是转录起始调控的结构基础

在基因内和基因外都有一些特定的**DNA**序列，与结构基因表达调控相关、能够被基因调控蛋白特异性识别和结合，这些特定的**DNA**序列称为顺式作用元件（**cis-acting elements**），亦称为顺式调控元件。在原核生物中主要是启动子、阻遏蛋白结合位点、正调控蛋白结合位点、增强子等。



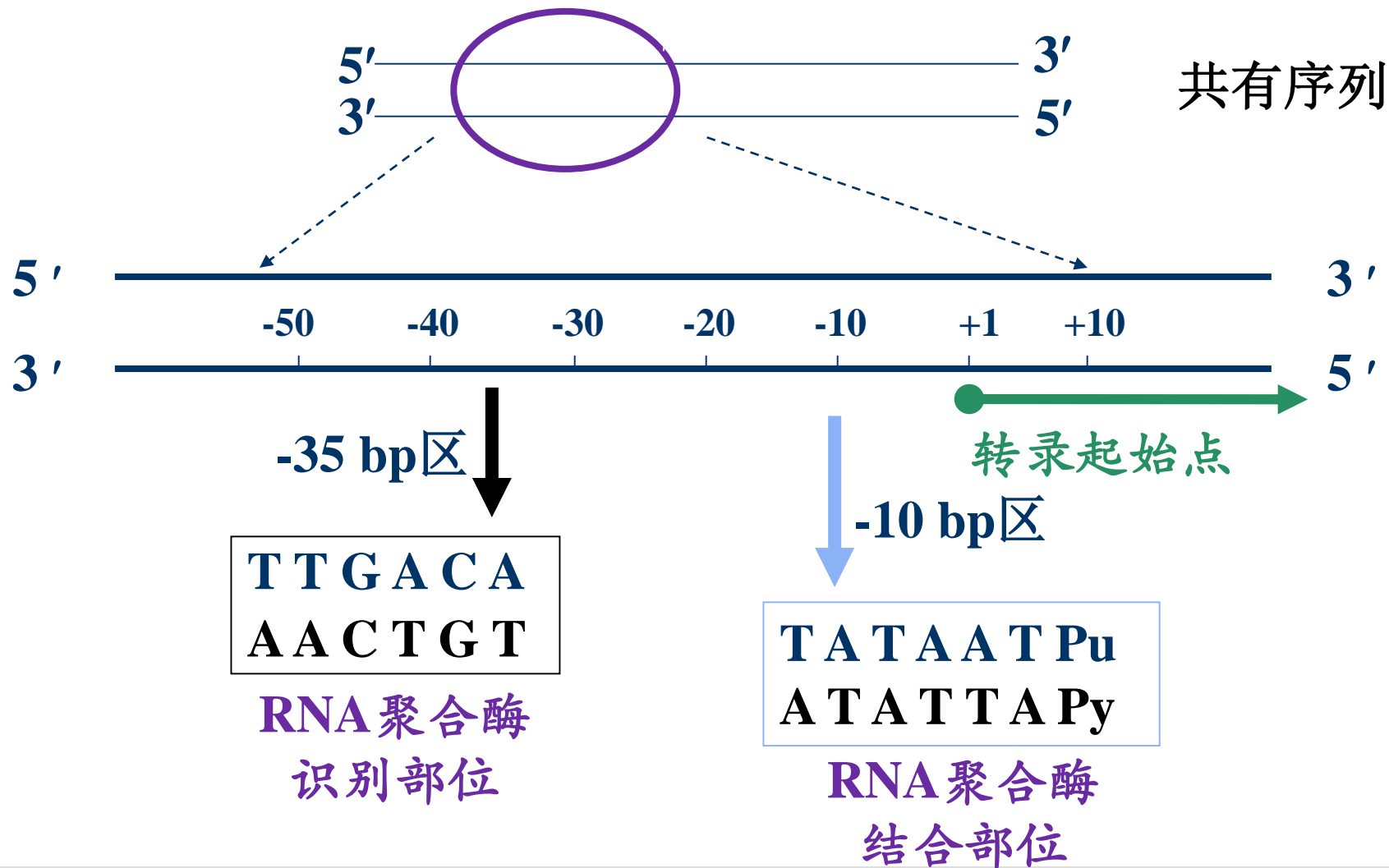
## 顺式作用元件（**cis-acting elements**）

——可影响自身基因表达活性的**DNA**序列

# 1. 启动子是RNA聚合酶识别和结合的部位。



## 原核生物启动子



# 原核生物启动子共有序列



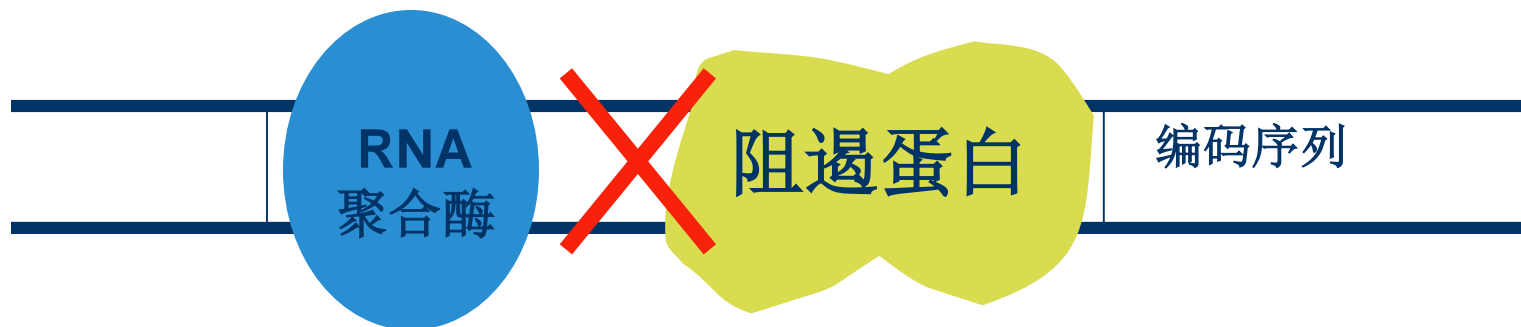
	-35区		-10区		RNA转录起始
<i>trp</i>	TTGACA	N <sub>17</sub>	TTAACT	N <sub>7</sub>	A
tRNA <sup>Tyr</sup>	TTTACA	N <sub>16</sub>	TATGAT	N <sub>7</sub>	A
<i>lac</i>	TTTACA	N <sub>17</sub>	TATGTT	N <sub>6</sub>	A
<i>recA</i>	TTGATA	N <sub>16</sub>	TATAAT	N <sub>7</sub>	A
<i>Ara BAD</i>	CTGACG	N <sub>16</sub>	TACTGT	N <sub>6</sub>	A

TTGACA                      TATAAT

## 2. 阻遏蛋白结合位点:

操纵元件(operator), 紧接在启动子下游, 通常与启动子有部分重叠。

当操纵元件结合有阻遏蛋白时, 会阻碍RNA聚合酶与启动子的结合, 或是RNA聚合酶不能沿DNA向前移动, 阻碍转录。



### 3. 正调控蛋白结合位点:

对基因转录起正向调控作用，是正调控蛋白识别和结合的**DNA**序列，通常在启动子上游。

### 4. 增强子

## 二、特定蛋白质与DNA结合后控制转录起始

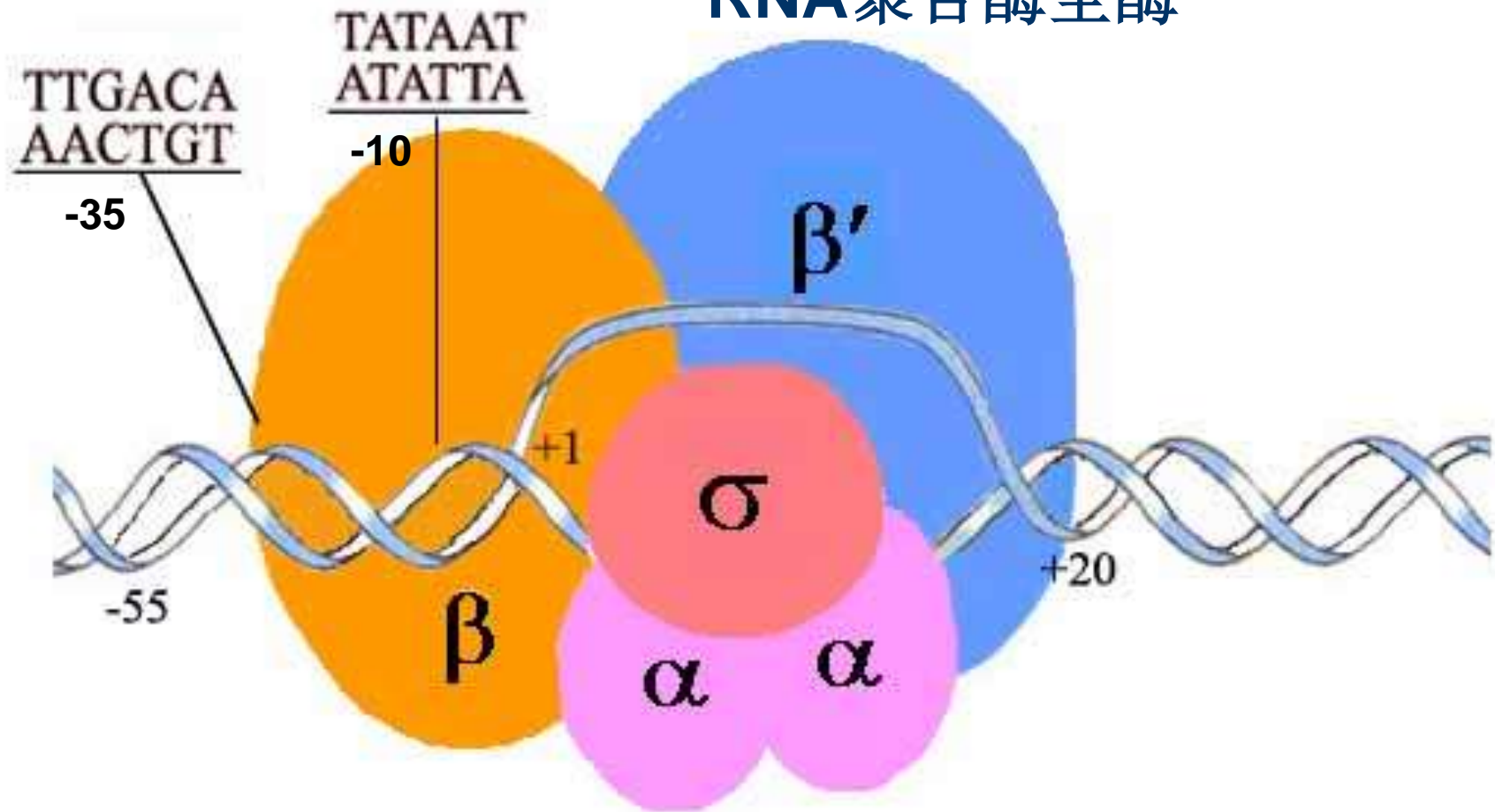


### (一) $\sigma$ 因子和启动子决定转录是否能够起始

在转录起始阶段， $\sigma$ 因子识别特异启动子；不同的 $\sigma$ 因子决定特异基因的转录激活，决定mRNA、rRNA和tRNA等基因的转录。



## RNA聚合酶全酶



识别*E.coli*启动子中一致性序列的 $\sigma$ 因子主要是 $\sigma^{70}$ 因子

# 大肠杆菌不同的 $\sigma$ 因子

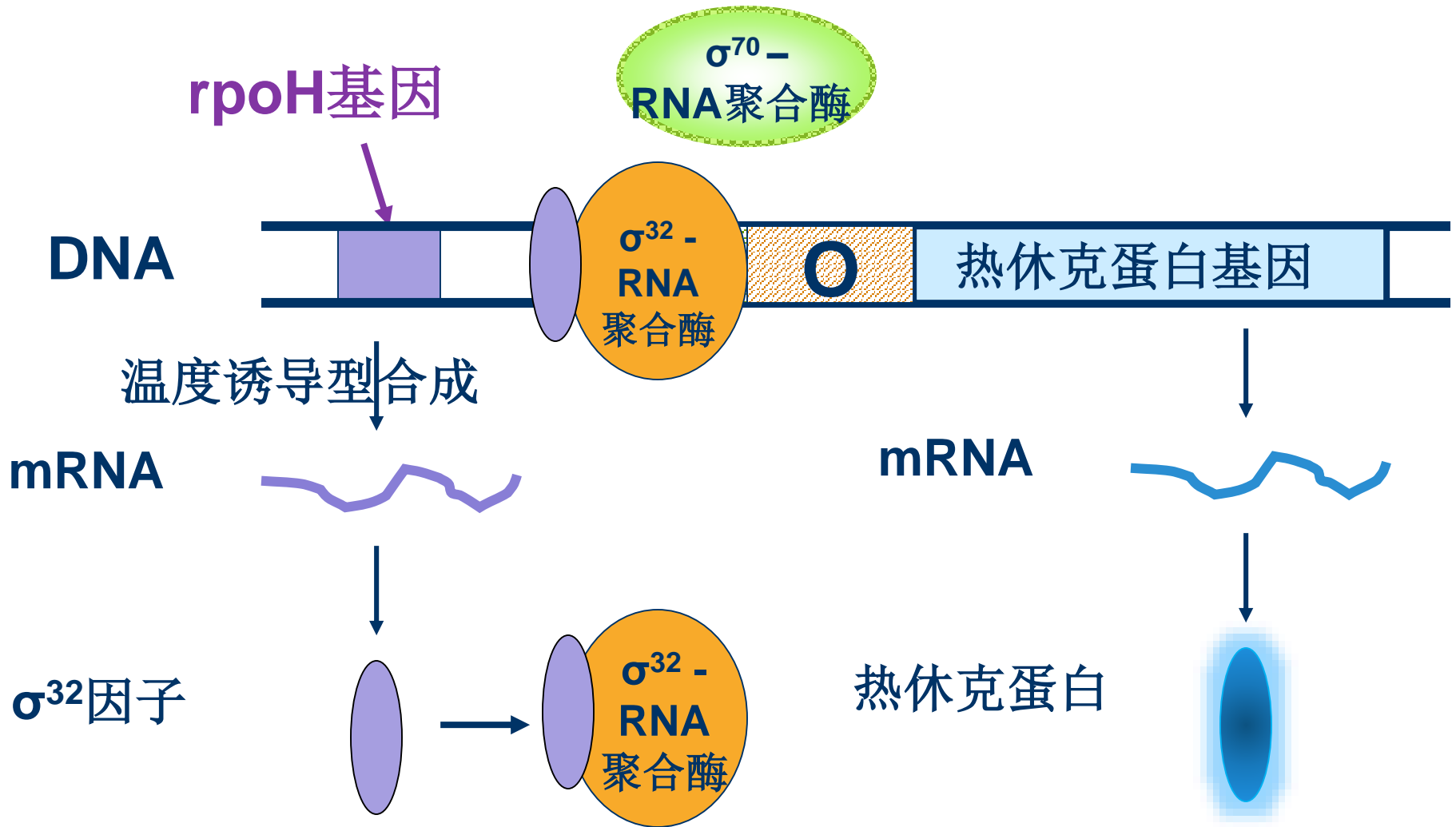


Gene	Factor	Use
<i>rpoD</i>	$\sigma^{70}$	general
<i>rpoS</i>	$\sigma^S$	stress
<i>rpoH</i>	$\sigma^{32}$	heat shock
<i>rpoE</i>	$\sigma^E$	heat shock
<i>rpoN</i>	$\sigma^{54}$	nitrogen
<i>fliA</i>	$\sigma^{28}$ ( $\sigma^F$ )	flagellar

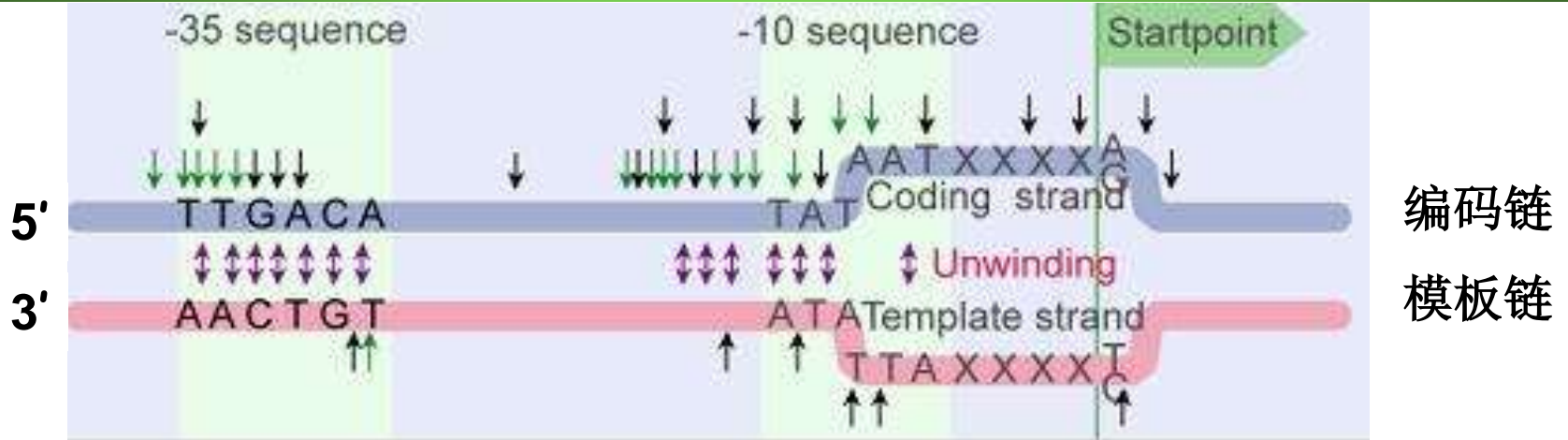
## ❖ $\sigma$ 因子识别特异的启动序列

Gene	Factor	-35 Sequence	Separation	-10 Sequence
<i>rpoD</i>	$\sigma^{70}$	TTGACA	16-18 bp	TATAAT
<i>rpoH</i>	$\sigma^{32}$	CCCTTGAA	13-15 bp	CCCGATNT

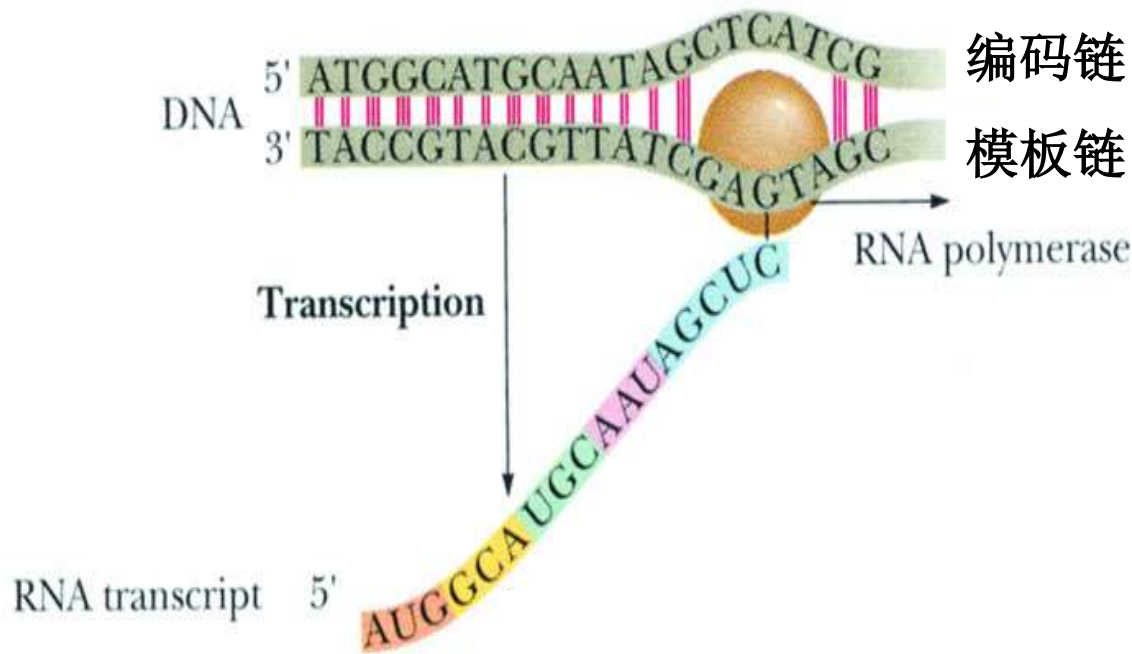
# $\sigma$ 因子控制特定基因的表达



# 启动子决定转录方向及模板链



编码链  
模板链



编码链  
模板链



## (二) 阻遏蛋白结合操纵元件对转录起始进行负调控

❖ **阻遏蛋白**：对基因表达有抑制作用的蛋白质，主要通过抑制开放起始复合物的形成而抑制基因转录。

阻遏蛋白与**DNA**结合后，**RNA**聚合酶仍有可能与启动子结合，但不能形成开放起始复合物，不能启动转录，这种作用称为阻遏 (repression)。

特定的信号分子与阻遏蛋白结合，使阻遏蛋白失活，从**DNA**上脱落下来，称为去阻遏，或脱阻遏 (derepression)。



RNA聚合酶全酶

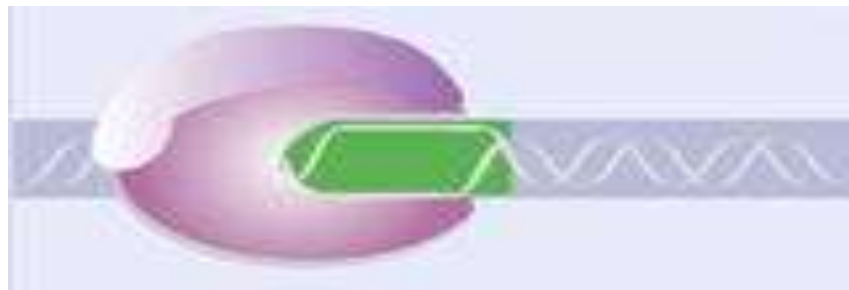
闭合起始复合物



DNA

RNA聚合酶全酶

开放起始复合物



DNA





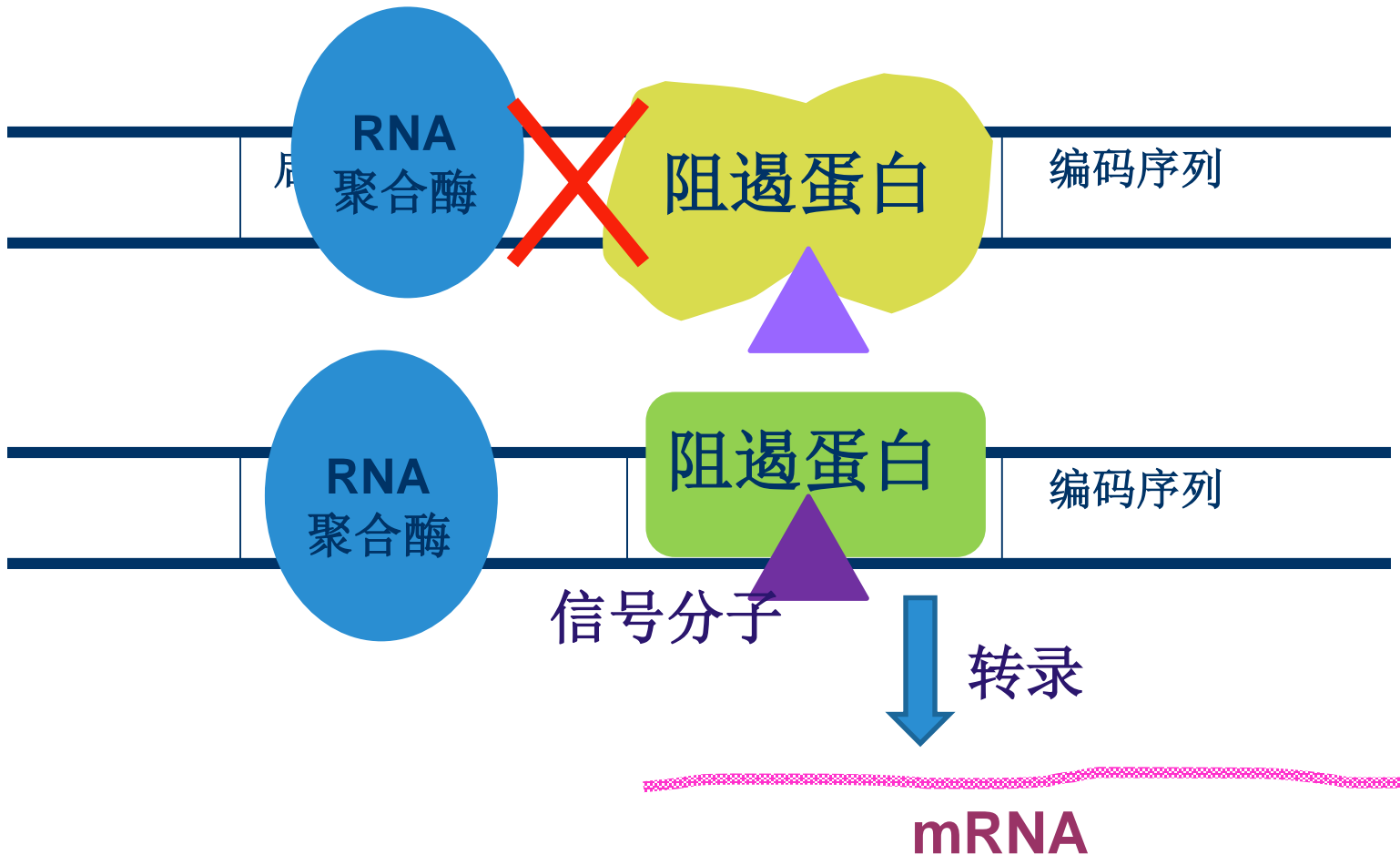
阻遏蛋白都可以与信号分子结合而发生变构，在不同构象时，阻遏蛋白或者与**DNA**结合，或者与**DNA**解离。

在可诱导型操纵子中，信号分子使阻遏物从**DNA**释放下来，解除对转录的抑制作用；在可阻遏型操纵子中，信号分子使阻遏物结合**DNA**，抑制转录。

在两种情况下，阻遏蛋白结合于**DNA**后都是抑制转录，这种类型的基因表达调控称为**负调控**。



# 可诱导型操纵子



阻遏蛋白

可阻遏型操纵子

阻遏蛋白



转录

mRNA

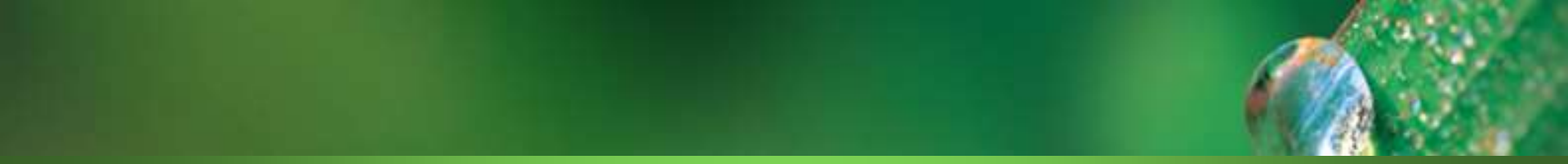


信号分子



### (三) 激活蛋白结合正调控元件而对转录起始进行正调控

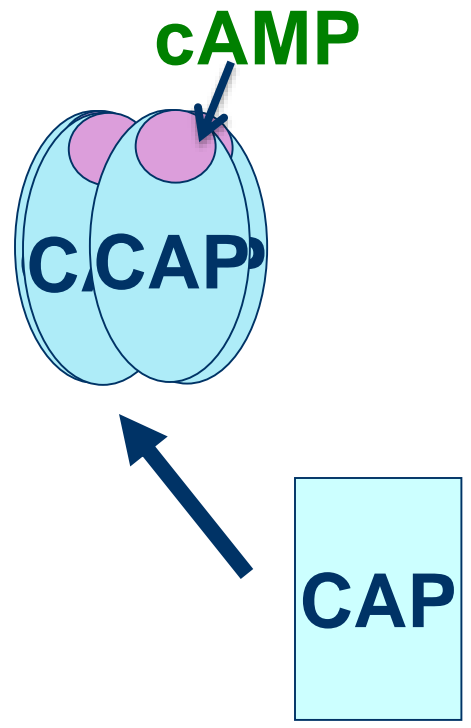
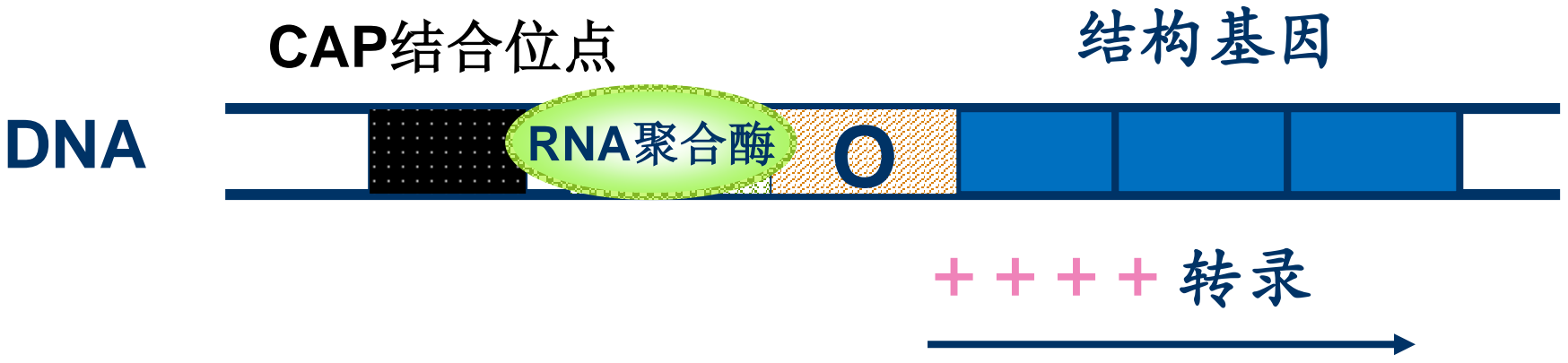
1. 正调控蛋白可结合启动子邻近序列进行调控
2. 激活蛋白结合增强子可远距离进行转录起始正调控



❖ **正调控蛋白**：可结合启动子邻近的DNA序列，促进RNA聚合酶与启动子的结合，增强RNA聚合酶活性，例如**CAP (catabolite gene activator protein, 分解代谢物基因活化蛋白)**。

有些基因在没有**正调控蛋白**存在时，RNA聚合酶很少或完全不能结合启动子。

# 正调控蛋白可结合启动子邻近序列进行调控



❖ **CAP** (catabolite gene activator protein, 分解代谢物基因活化蛋白)

Transcription

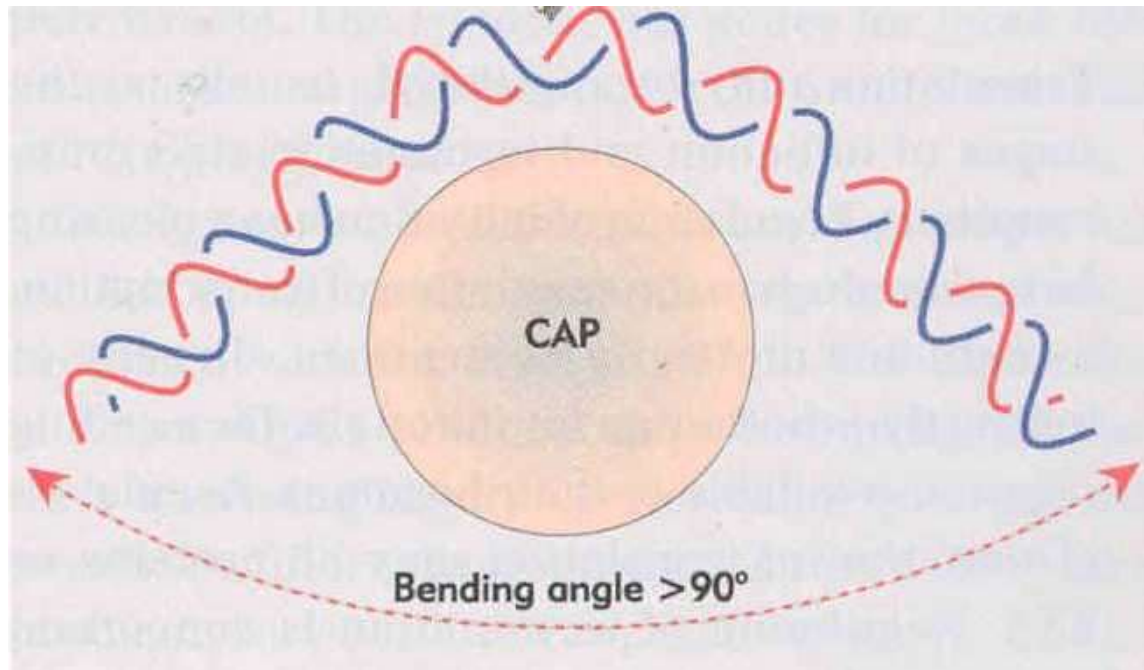


AANTGTGANNTNNNTTCANATTNN  
TTNACA CTNNANNNAGTNA AANN

Highly conserved  
pentamer

Less conserved  
pentamer

## CAP结合位点



### 三、细菌的转录过程可通过不同模式进行调控



(一) 乳糖操纵子 (*lac* 操纵子)

(二) 色氨酸操纵子 (*trp* 操纵子)

(三) 阿拉伯糖操纵子

# (一) 乳糖操纵子 (*lac*操纵子)

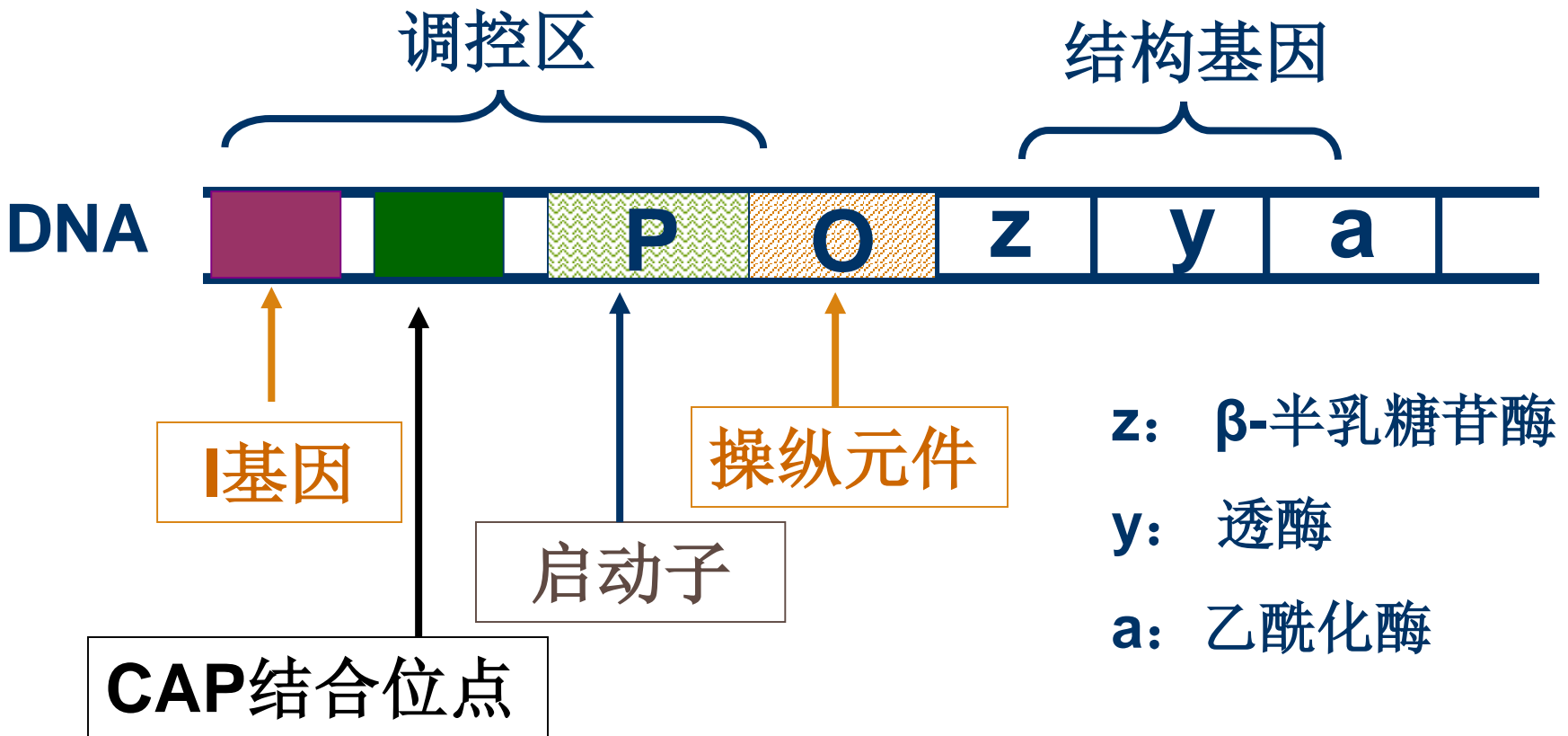
1961年，法国科学家莫诺 (J·L·Monod) 与雅可布 (F·Jacob) 提出操纵子学说，开创了基因调控的研究。四年后的1965年，莫诺与雅可布荣获诺贝尔生理学与医学奖。



莫诺与雅可布最初发现的是大肠杆菌的乳糖操纵子

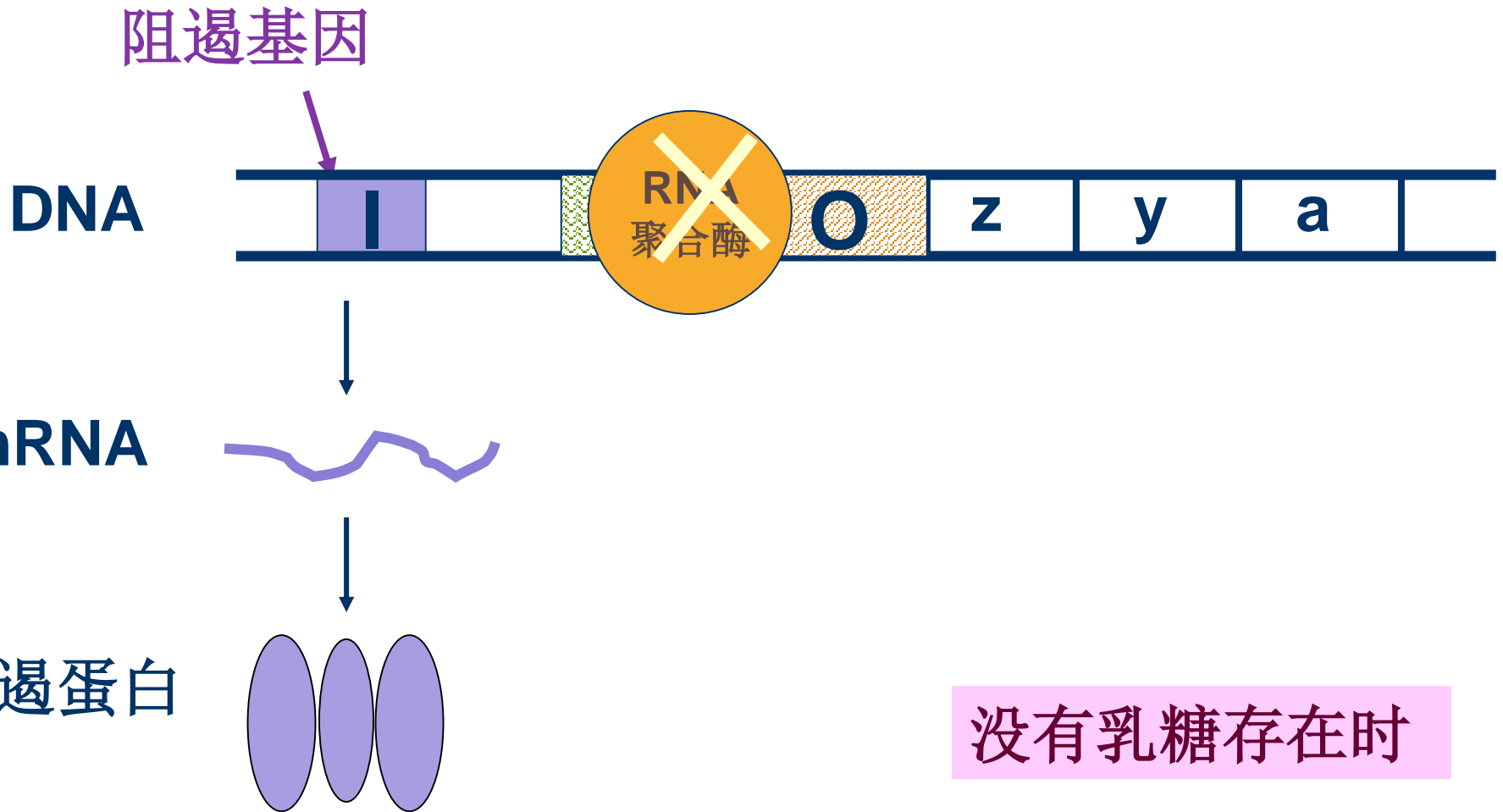


# 1. 乳糖操纵子的结构



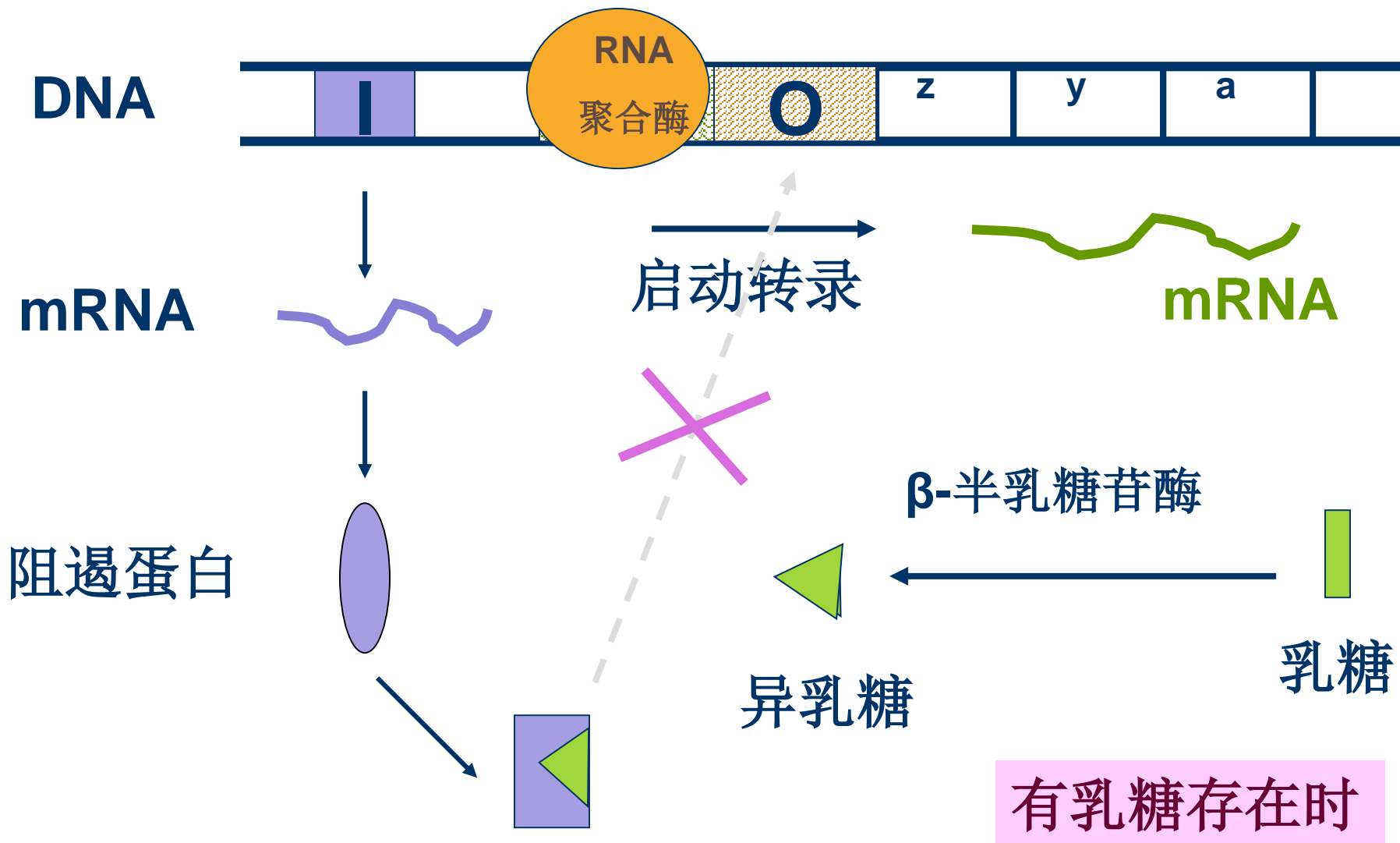
## 2. 乳糖操纵子的调控机制

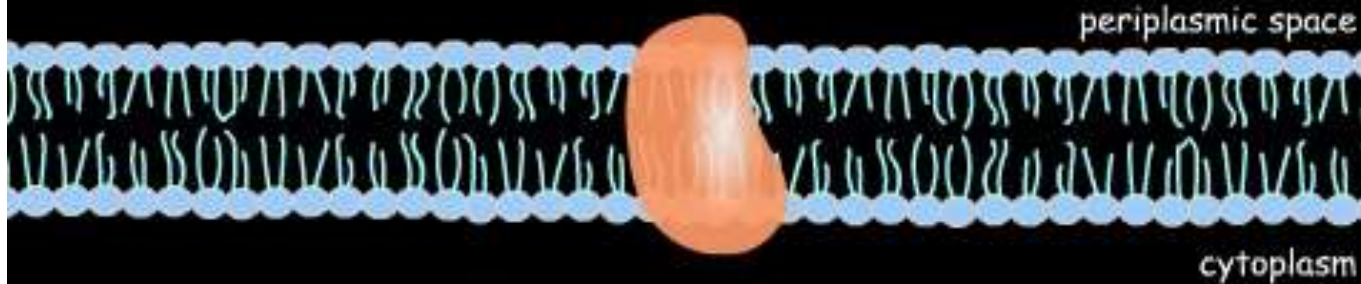
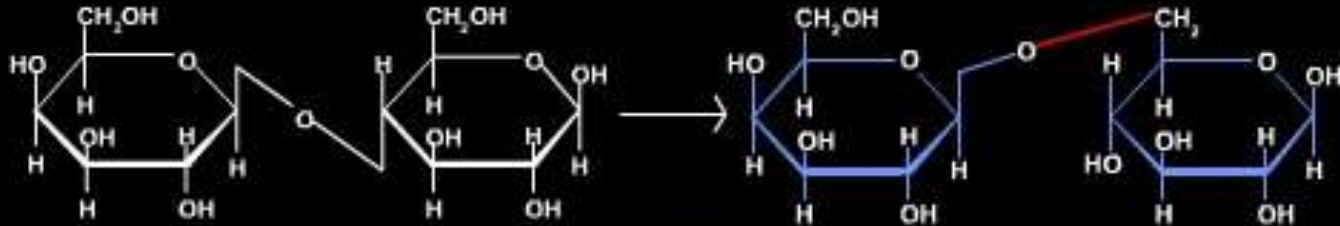
### ❖ 乳糖操纵子被阻遏蛋白封闭





# ❖ 乳糖操纵子被诱导物开放





阻遏蛋白



$\beta$ -半乳糖苷酶

$\beta$ -galactosidase



透酶

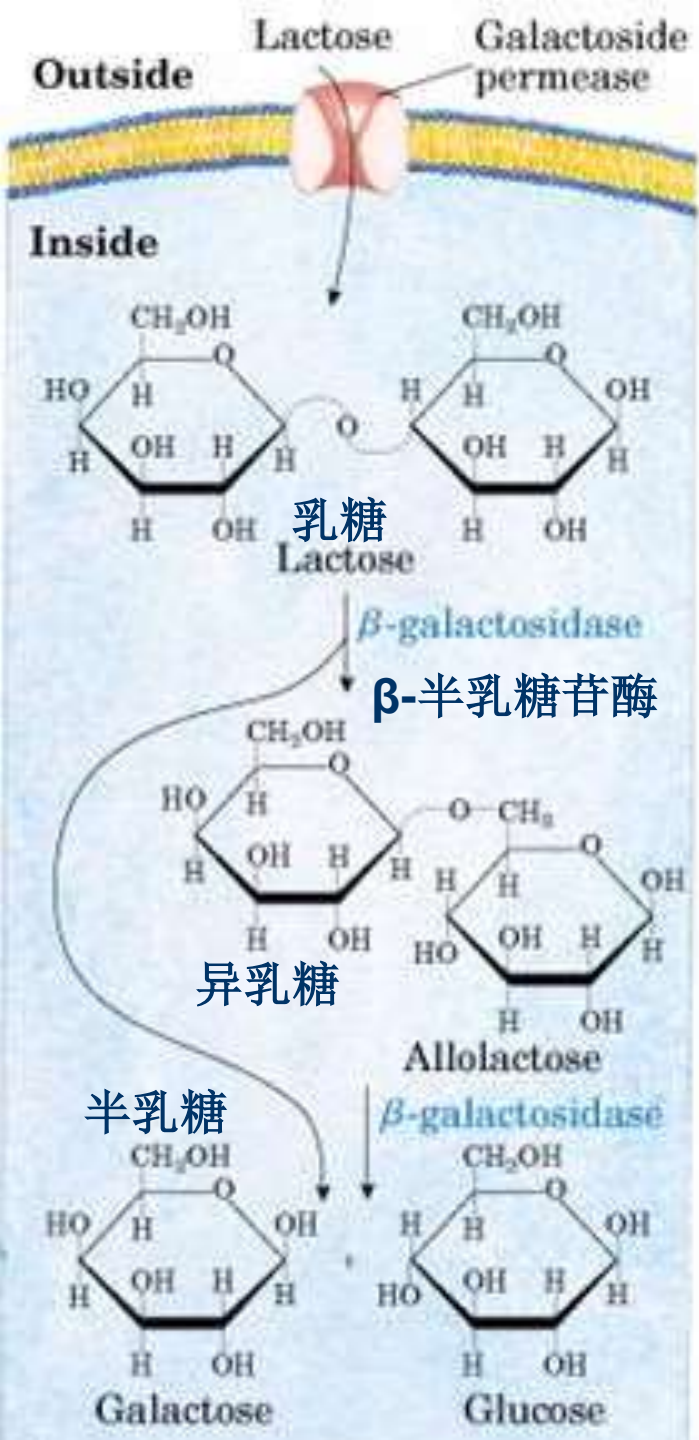
lactose permease



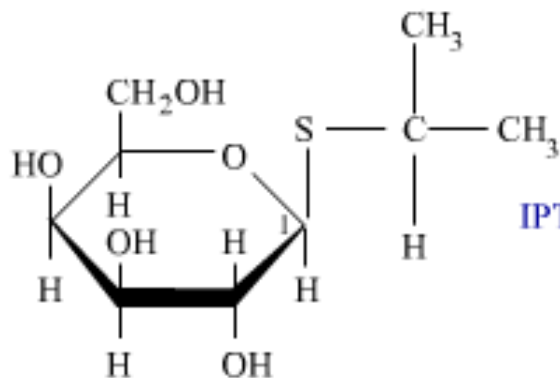
乙酰化

thiogalactoside  
transacetylase

# 半乳糖苷透酶



异乳糖是lac操纵子转录的诱导物。  
 异丙基硫代半乳糖苷 (isopropyl thiogalactoside, IPTG) 结构上类似于异乳糖、不能被β-半乳糖苷酶水解，常用于诱导细菌中使用了lac启动子的质粒载体的重组蛋白的表达。



IPTG不是β-半乳糖苷酶可切割的底物

•乳糖操纵子是可诱导型操纵子

## ❖ 乳糖操纵子由cAMP-CAP系统进行正调控




TTGACA

TATAAT

共有序列

- 乳糖操纵子是弱启动子，被RNA-pol结合后，还需cAMP-CAP（分解代谢物基因活化蛋白）活化



葡萄糖代谢产物 { 抑制腺苷酸环化酶  
                          { 激活磷酸二酯酶

有葡萄糖，cAMP浓度低

无葡萄糖，cAMP浓度高

## 葡萄糖效应

当培养环境中存在葡萄糖时，即使加入乳糖、阿拉伯糖等其它糖，细菌仍首先利用葡萄糖。葡萄糖消耗完毕后，cAMP-CAP调控乳糖操纵子、阿拉伯糖操纵子等的表达。



# 乳糖操纵子的双重调控

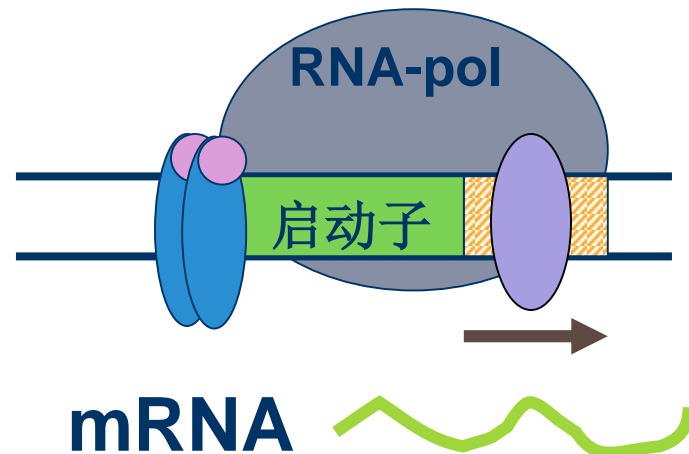
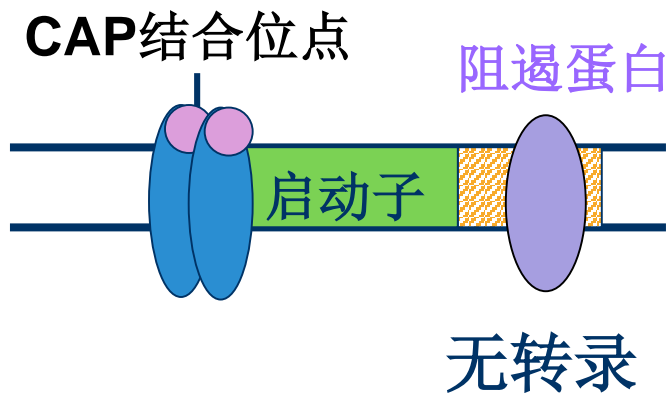


-乳糖

+乳糖

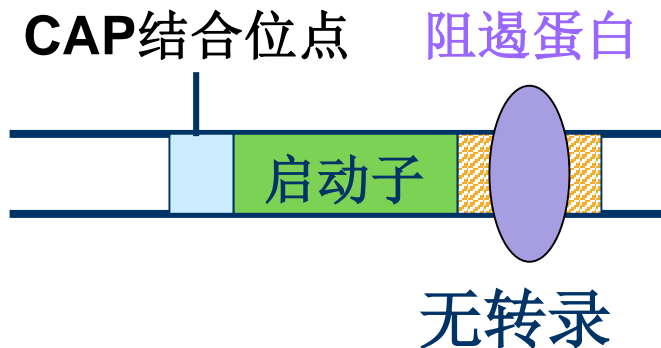
-葡萄糖

cAMP浓度高



+葡萄糖

cAMP浓度低







## (二) 色氨酸操纵子

色氨酸操纵子(*trp operon*)除了产物阻遏负调控外，还有转录**衰减(attenuation)**调控方式。

衰减是转录-翻译的偶联调控。



# 1. 色氨酸操纵子是可阻遏型操纵子

## 分解和合成代谢的操纵子

操纵子	基础状态	调控方式
分解代谢	关闭	由诱导物开放
合成代谢	开放	由阻遏物关闭

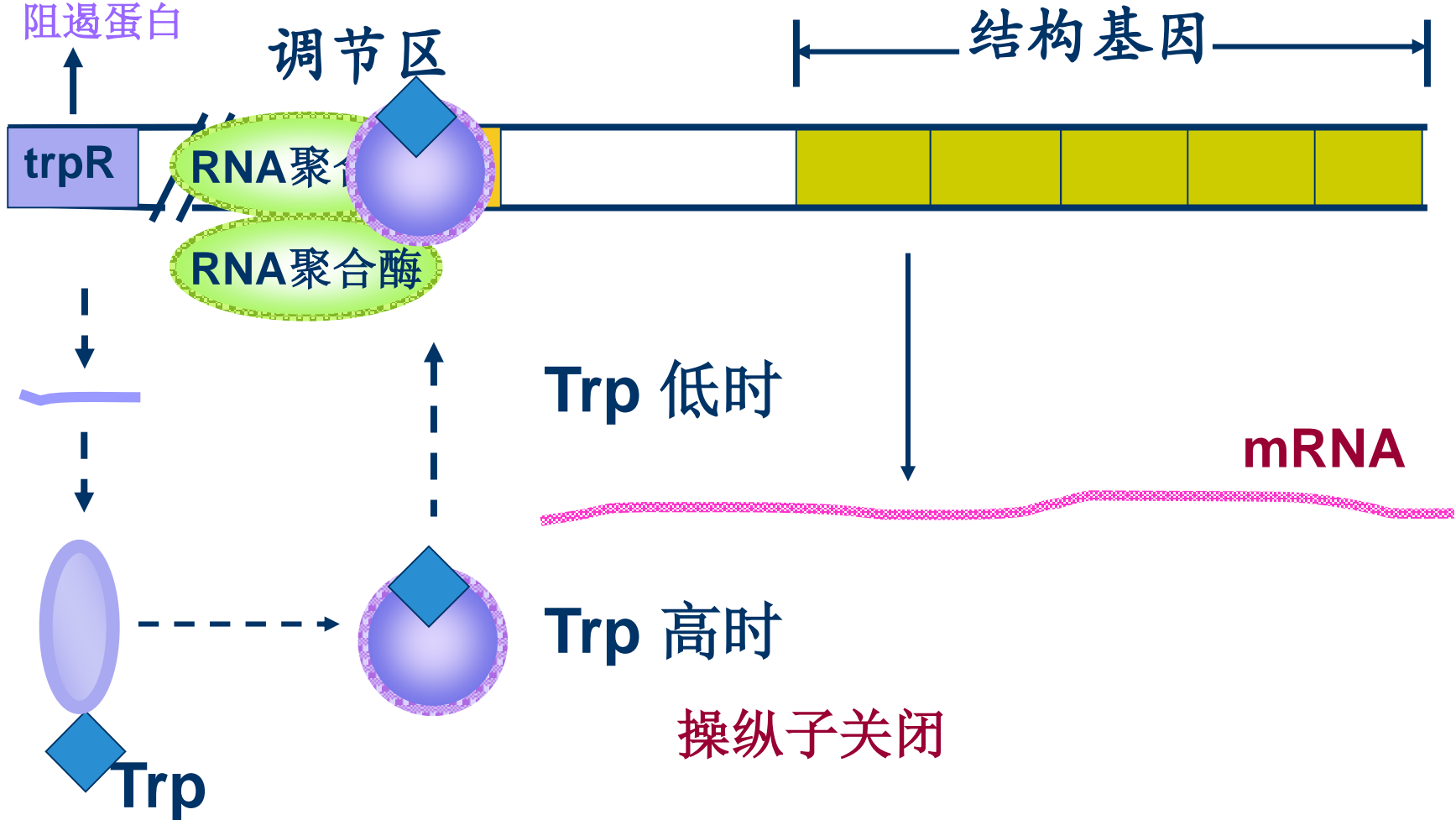
合成代谢操纵子由合成产物关闭

合成代谢操纵子在基础状态下持续开放，在产物满足需要量时才关闭。

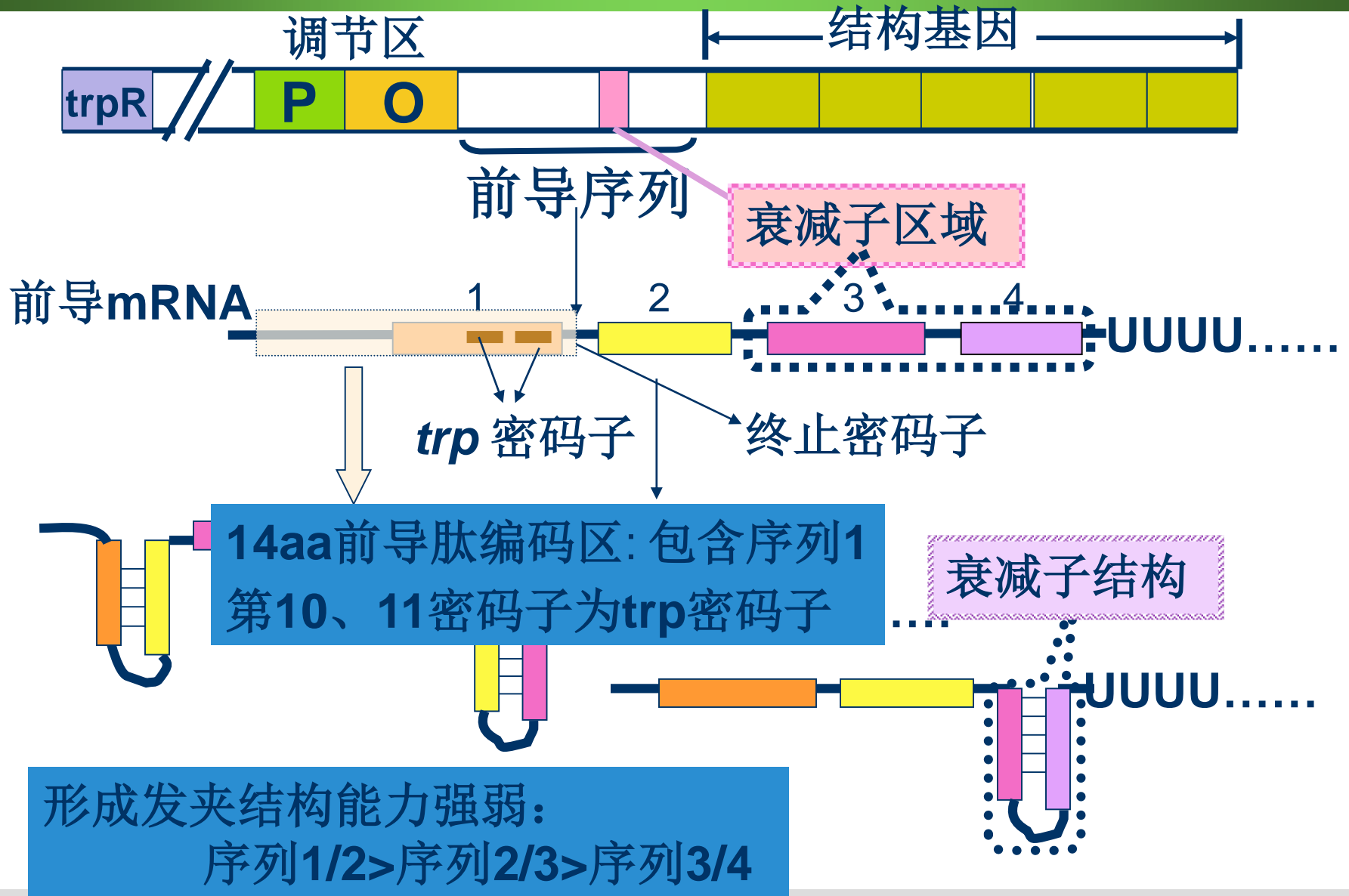
## 2. 色氨酸操纵子的负调控作用



编码色氨酸操纵子  
阻遏蛋白



### 3. 色氨酸操纵子的转录衰减作用





序列**3**、**4**形成的发夹结构（衰减子结构）是终止子，  
可使转录终止——非依赖 **Rho**因子的转录终止

## 特征

- 1) 有连续的尿嘧啶
- 2) 在连续的尿嘧啶之前有富含鸟嘌呤和胞嘧啶、并能自身反向互补的碱基序列——形成茎环/发夹结构

## 作用

- 1) 使**RNA**聚合酶变构，转录停顿；
- 2) 使转录复合物趋于解离，**RNA**产物释放。



# 前导mRNA

*trp* 密码子

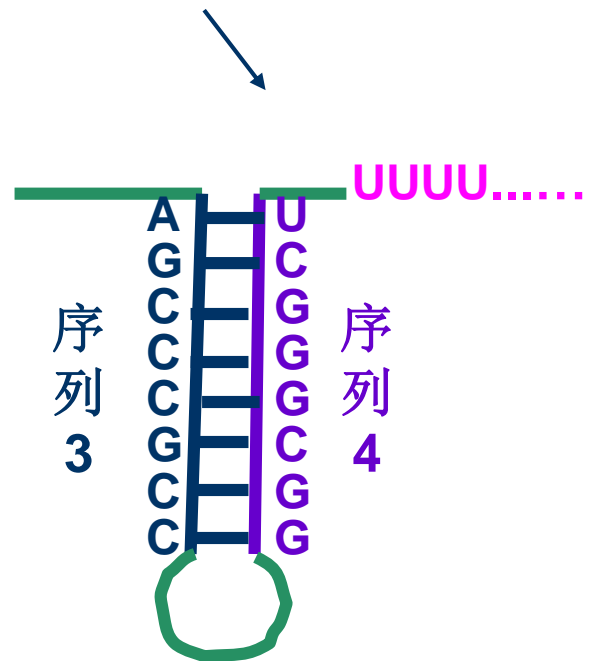
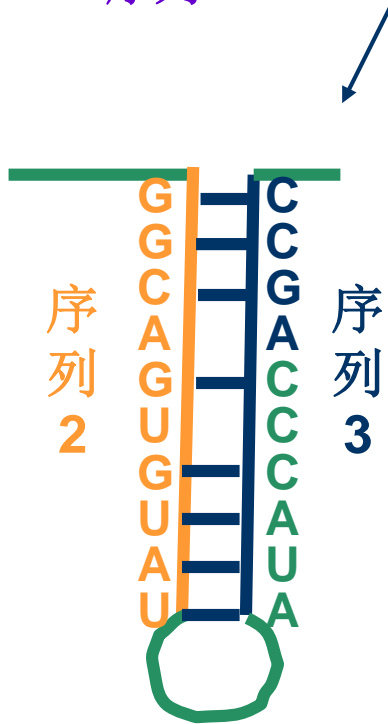
终止密码子

序列2

序列3

5' UGGUGGCGAACUUC UGAAC GGGCAGUGUAU ..... AUACCCAGCCC  
GCCUAAUGGCGGGCUUUUU... 3'

序列4



# 转录衰减机制

前导DNA

RNA聚合酶

前导mRNA

UUUU 3'

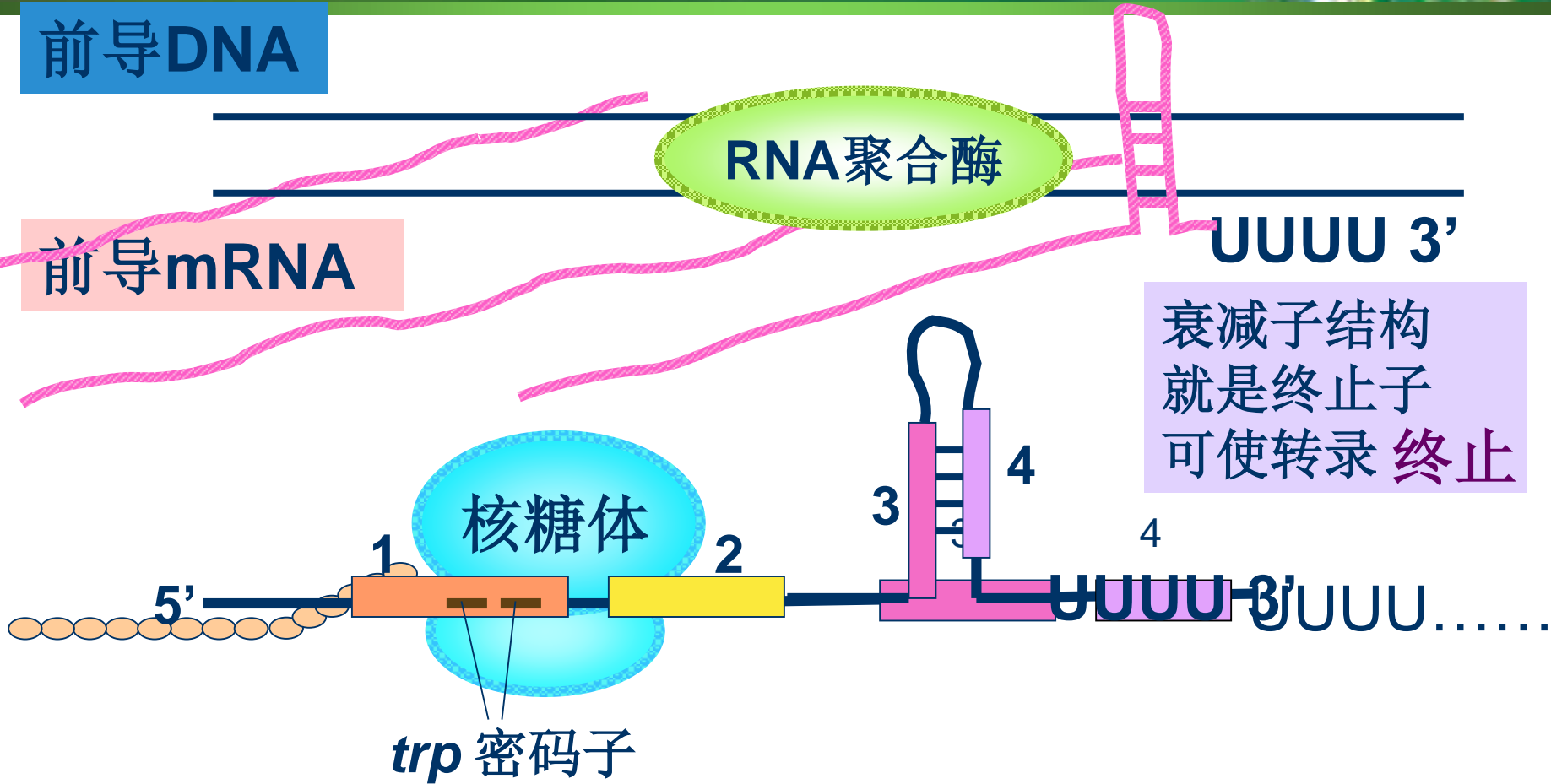
衰减子结构  
就是终止子  
可使转录 **终止**

核糖体

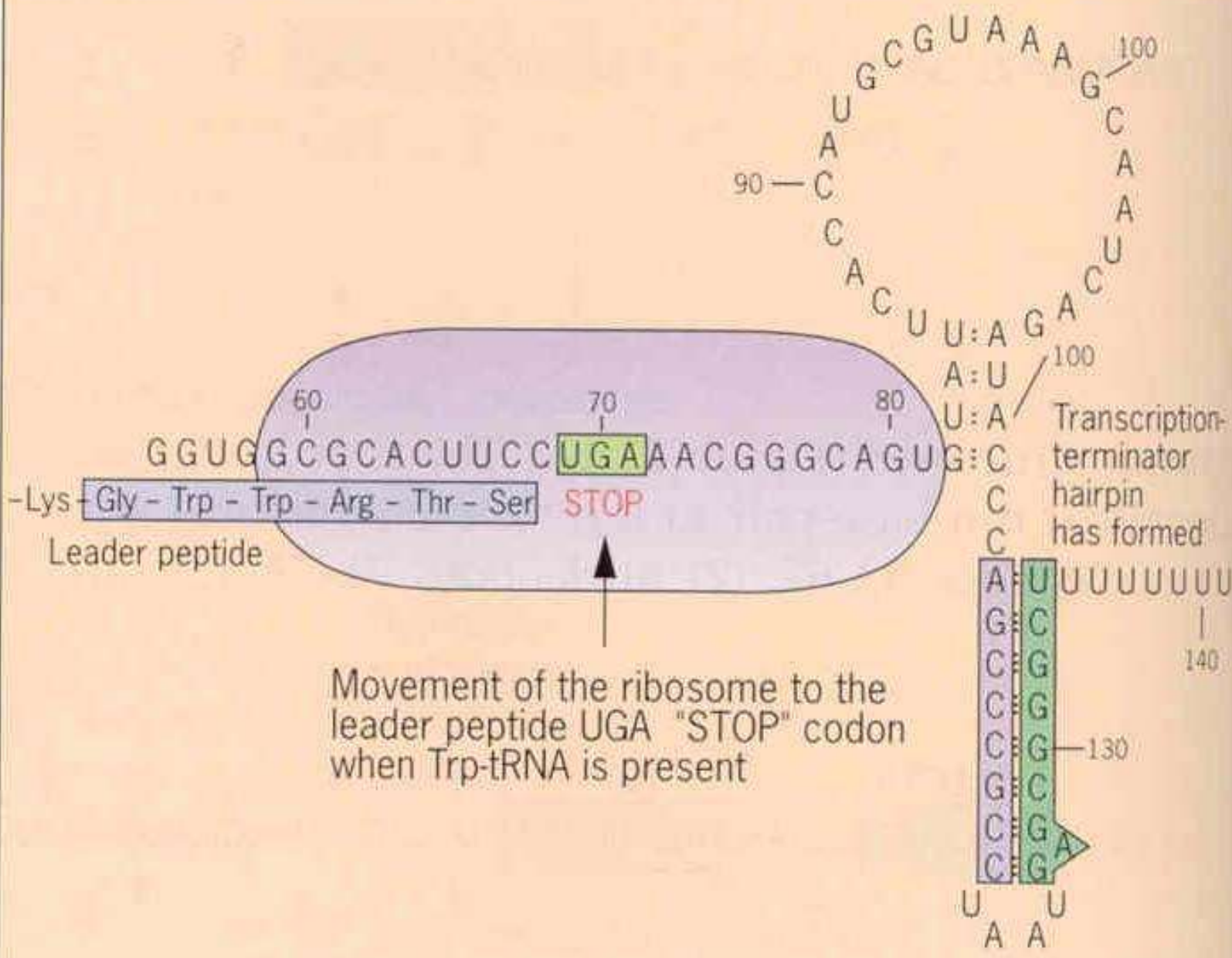
*trp* 密码子

前导肽

• 当色氨酸浓度较高时







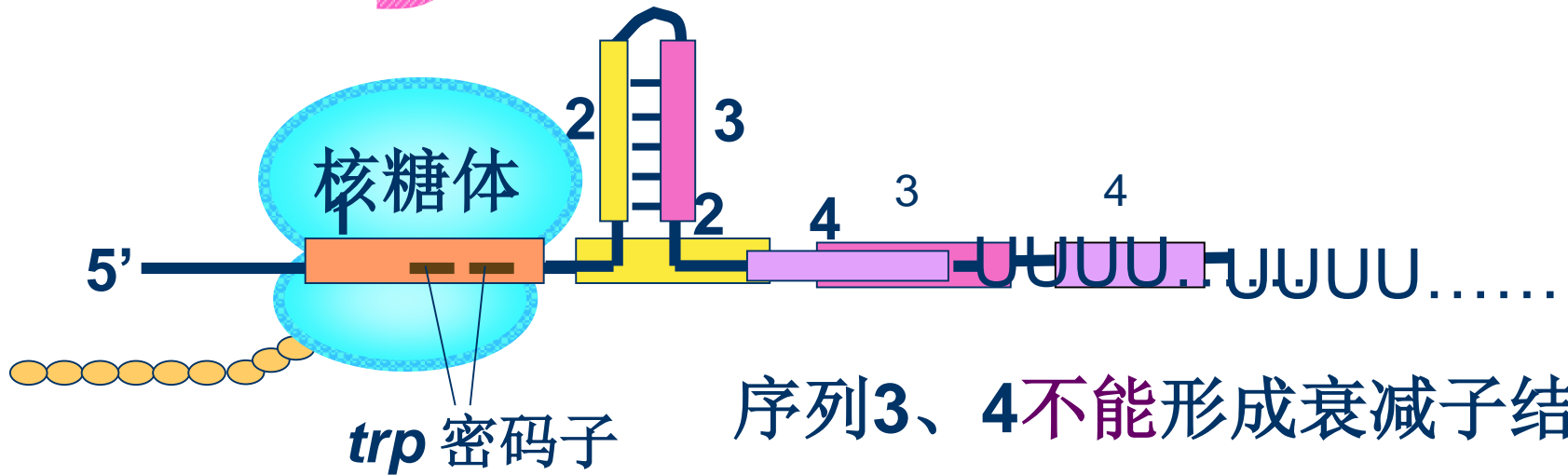
Movement of the ribosome to the leader peptide UGA "STOP" codon when Trp-tRNA is present

Trp合成酶系相关  
结构基因被转录

前导DNA

RNA聚合酶 结构基因

前导mRNA



前导肽

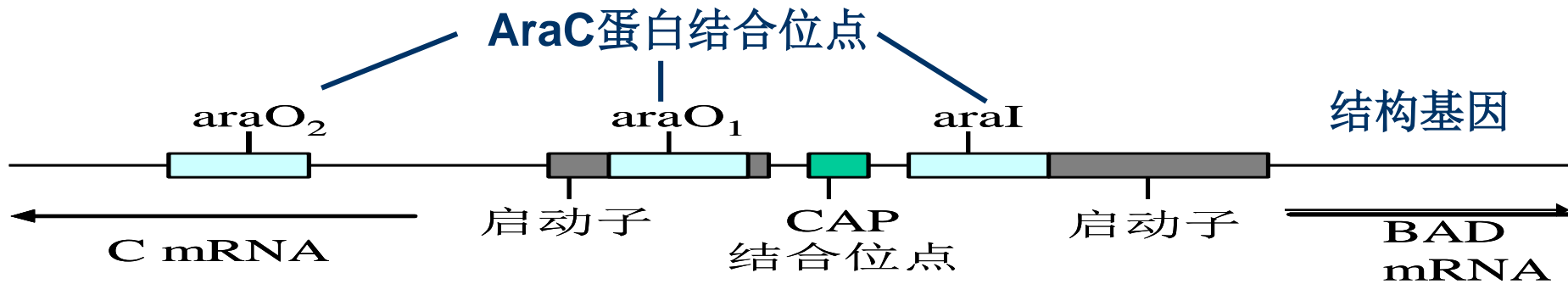
•当色氨酸缺乏时



- ❖ 色氨酸操纵子中的操纵元件和转录衰减可以起双重负调控作用
- ❖ 转录衰减机制更灵敏，即使色氨酸浓度不足以诱导阻遏蛋白结合操纵元件，也可以使mRNA转录提前终止。
- ❖ 反之，色氨酸浓度降低后，即使失去阻遏作用，只要还可以维持前导肽的合成，仍可继续阻止转录，保证尽可能充分地消耗色氨酸。

### (三) 阿拉伯糖操纵子

#### 阿拉伯糖操纵子的调控区

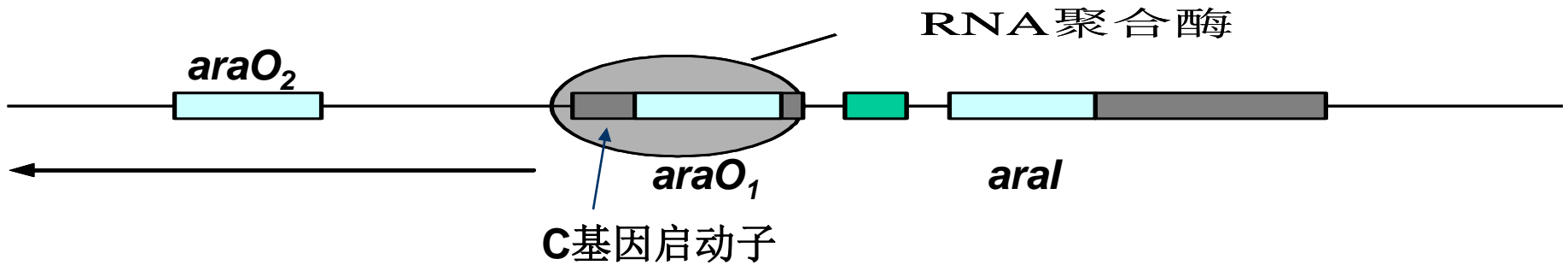


- ❖ C基因编码调控蛋白AraC
- ❖ AraC蛋白单独存在时，结合araO<sub>1</sub>、araO<sub>2</sub>和araI，表现负调控；

# 阿拉伯糖操纵子的转录起始调控

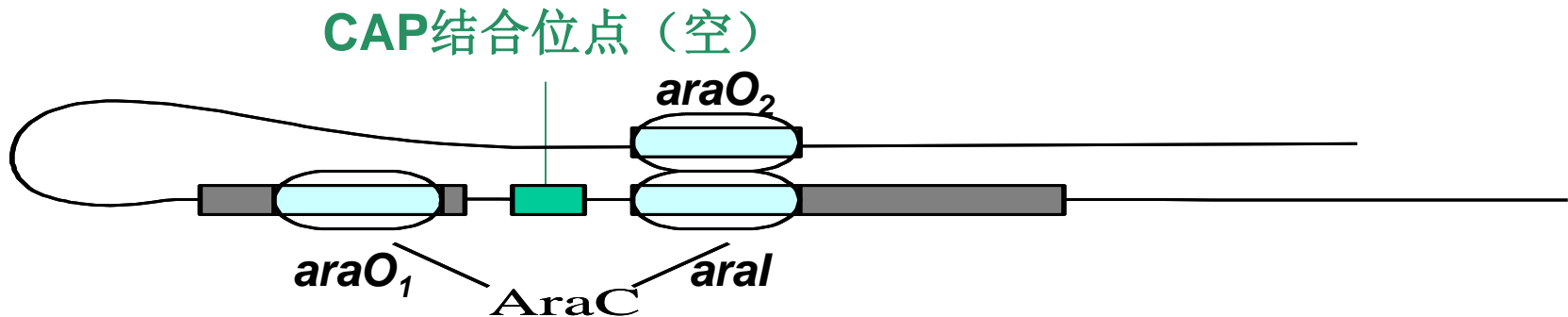


无AraC蛋白

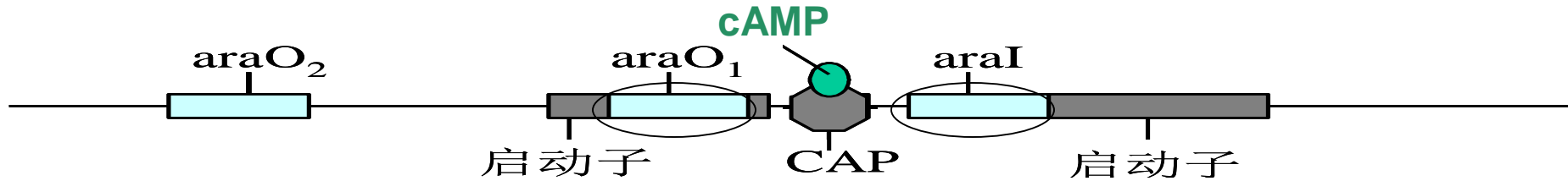


有AraC蛋白

1) 有葡萄糖，有或无阿拉伯糖

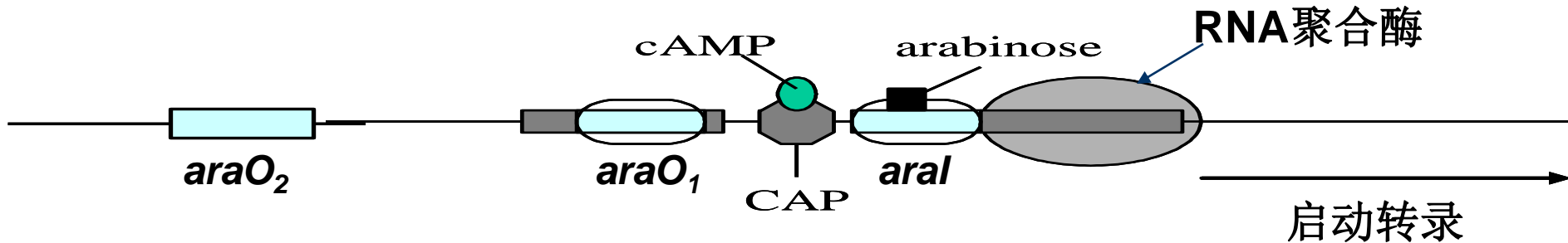


## 2) 无葡萄糖，无阿拉伯糖



❖ cAMP-CAP蛋白也可结合AraC蛋白使其发生变构，但主要起去阻遏作用

## 3) 无葡萄糖，有阿拉伯糖



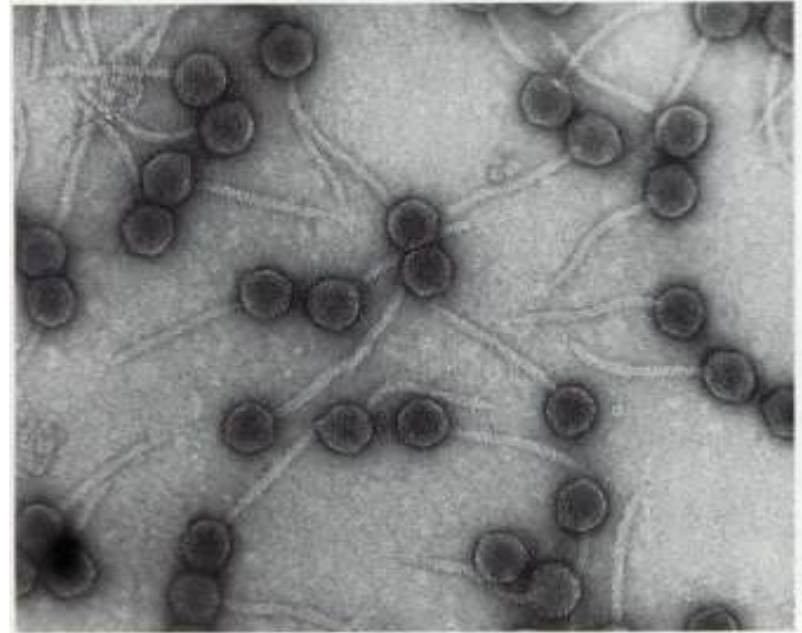
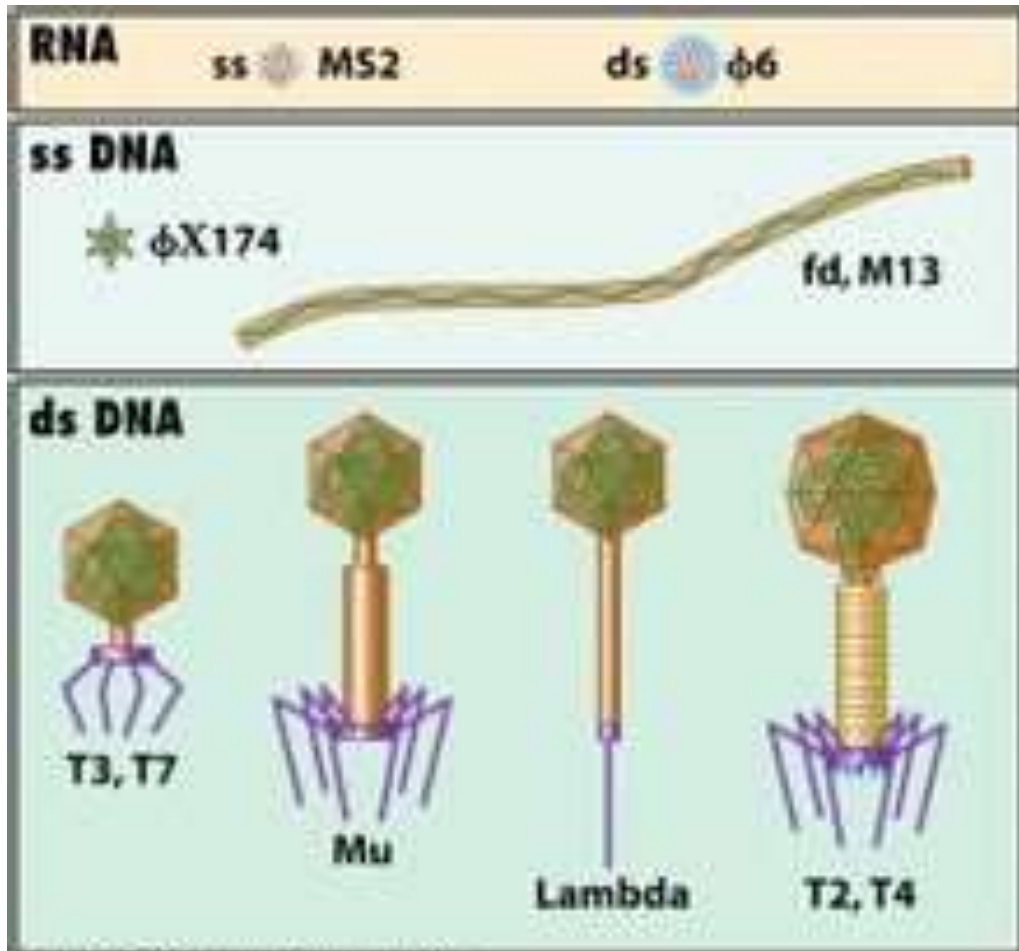
❖ 阿拉伯糖结合AraC蛋白可使其发生变构，从而激活转录，表现正调控

# $\lambda$ 噬菌体的 基因表达调控

Regulation of Gene Expression in  
Lambda Phage







λ噬菌体

Figure 6-12 Book Biology of Microorganisms 11/e  
© 2004 Pearson Education, Inc.

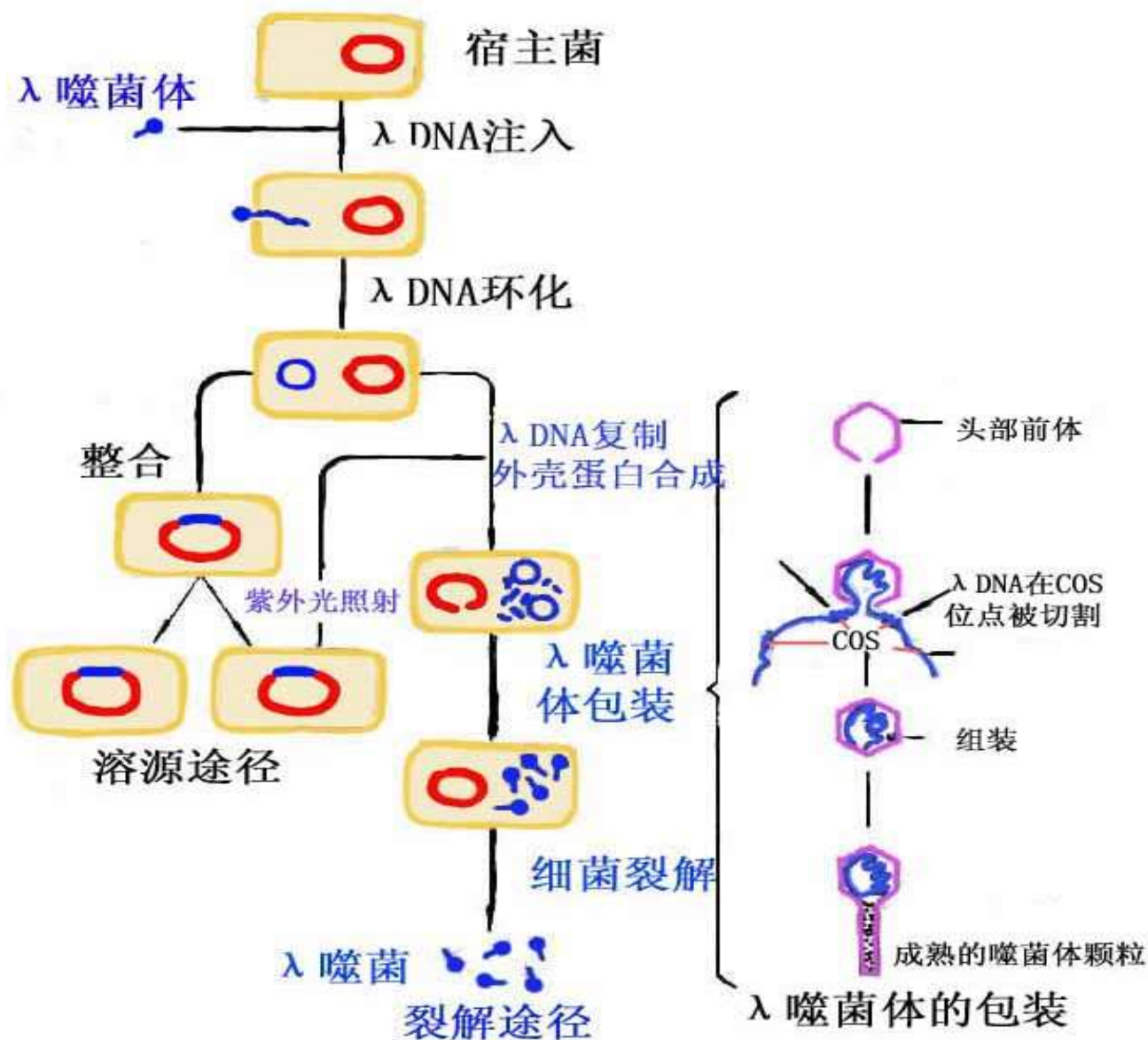


# $\lambda$ 噬菌体的生活史

溶菌/裂解生长方式(lytic pathway)

溶原生长方式(lysogenic pathway)

# λ噬菌体的溶原和裂解生活周期

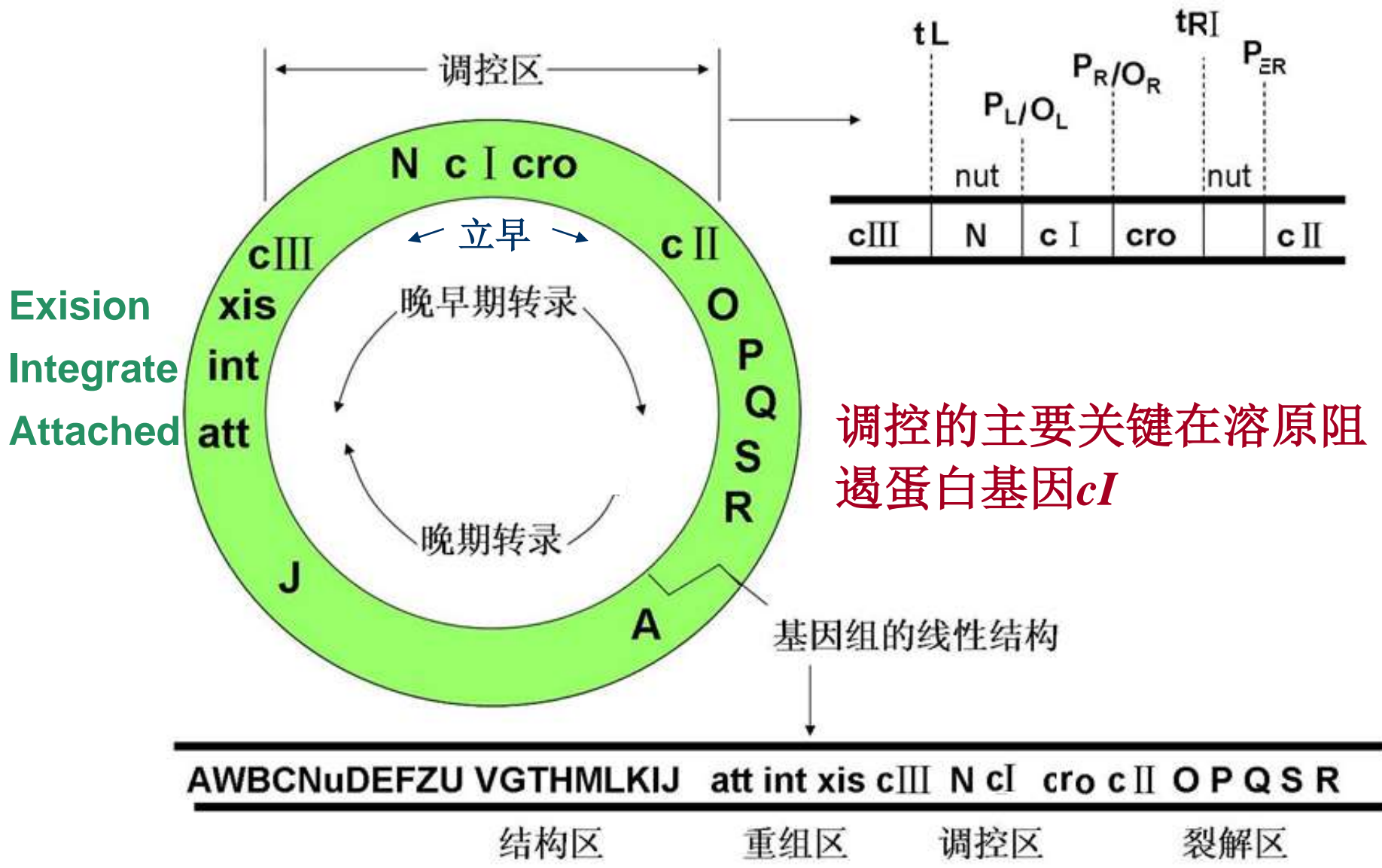




- ❖  $\lambda$ 噬菌体的溶原或溶菌作用受宿主内外生活环境影响，由基因表达调控决定。
- ❖ 溶原建立使 $\lambda$ DNA加入宿主的基因组，随宿主进行复制和表达。
- ❖ 加热或紫外线照射可诱导溶原状态转为溶菌， $\lambda$ DNA在宿主内独立复制而导致溶菌/裂解。



# 一、λ噬菌体的基因结构和调控区域



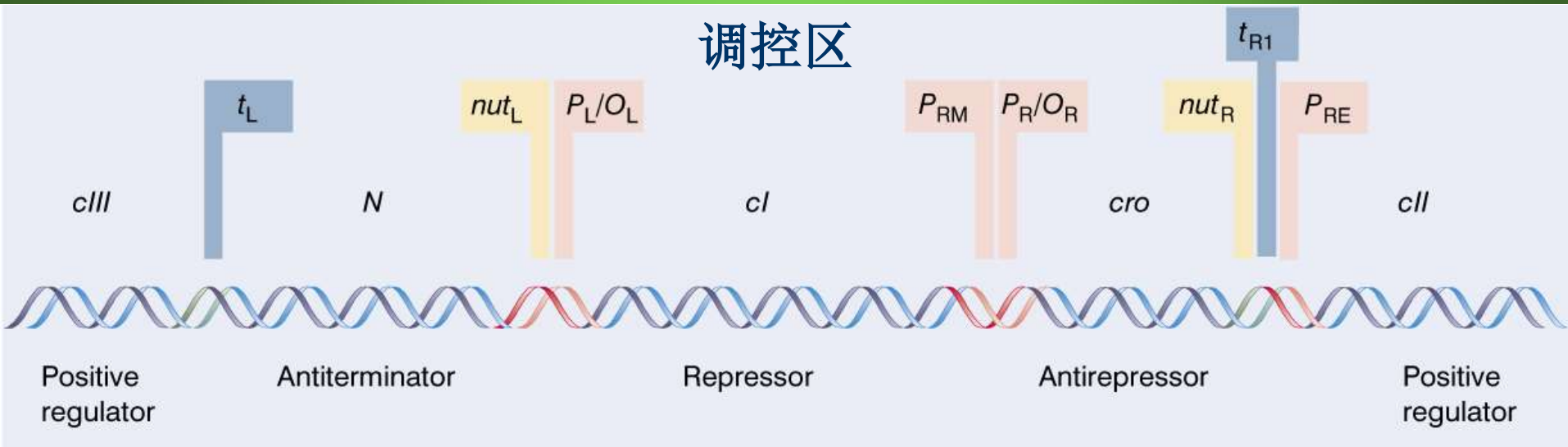
## 二、 $\lambda$ 噬菌体的转录周期



$\lambda$ 的转录按先后分即刻早期/立早(immediate early), 晚早期(delayed early)和晚期(late), 三期的表达依次连续相互制约。

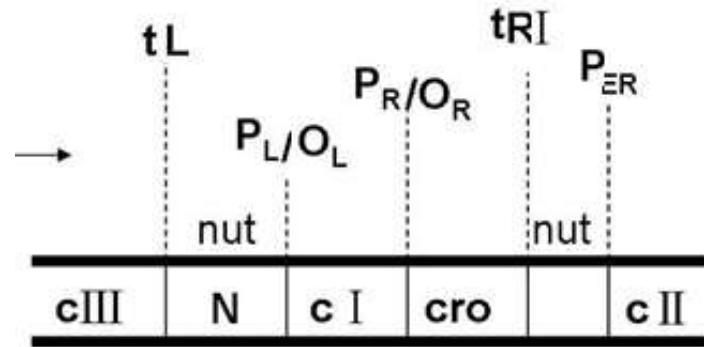
前两期转录是双向的。晚期转录单向, 在环状基因组从R沿环到A-J结构区, 和向左到达重组区的晚早期转录汇合, 完成一个转录周期。表达产物供溶菌周期装配感染型噬菌体。

### 三、λ噬菌体溶原生长方式的调控



- **cI** 和 **cro** 基因表达产物为阻遏蛋白，可结合操纵序列，但亲和力不同。
- **cII** 基因表达产物为转录激活蛋白，促进 **cI** 的转录。
- **cIII** 基因表达产物维持 **C II** 活性。
- **N** 基因表达产物是抗终止蛋白，作用于 **nut** 位点，抑制左右终止子的作用。

# cI编码的阻遏蛋白是溶原生长方式的关键



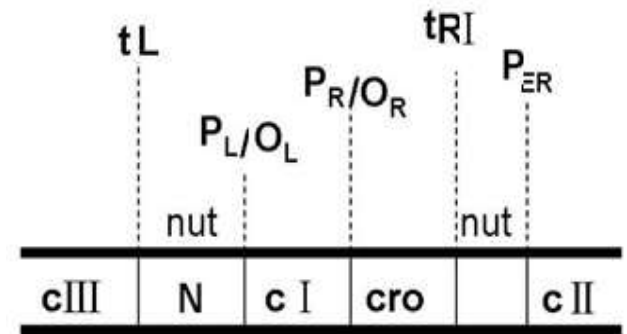
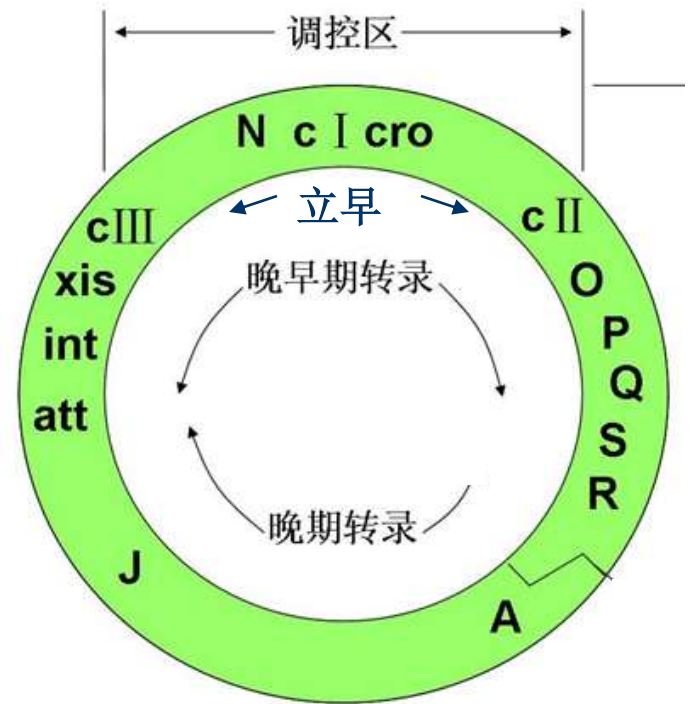
- $\lambda$ 噬菌体感染时，*cI*两侧启动子受宿主RNA pol催化向左转录出12S RNA，翻译为抗终止蛋白N；向右转录出7SRNA，翻译为Cro蛋白（立早期）。
- Cro蛋白浓度较低时，N蛋白在*nut*位点帮助RNA pol越过左、右终止点*tR*和*tL*，使CII、CIII表达。



# *cI*编码的阻遏蛋白是溶原生长方式的关键



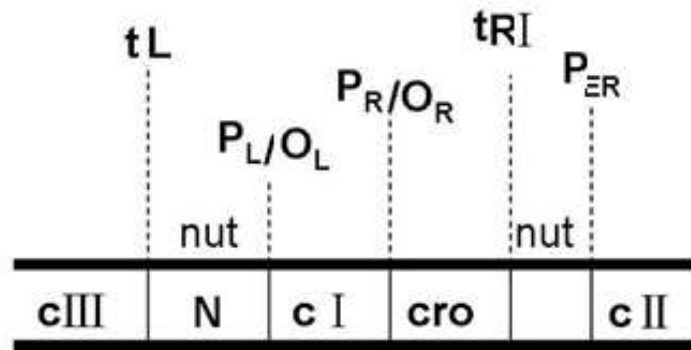
- *E. coli*的RNA pol 结合 $P_R$ 后不能向右转录，无法完成晚早和晚期表达，无结构蛋白生成。
- $P_L$ 的启动活性比 $P_R$ 强，可使重组区表达，产物分别有附着（att）、整合（int）和切割（xis）作用。
- 完成整合后，*CIII* 维持*CII* 活性，*CII*开启*cI*。
- *cI*单独表达，产生的阻遏蛋白*CI* 结合左、右操纵序列 $O_L$ 和 $O_R$ 封闭启动子，进入溶原状态。







## 四、 $\lambda$ 噬菌体溶菌生长方式的调控



加热或紫外线照射可诱导溶原状态转为溶菌

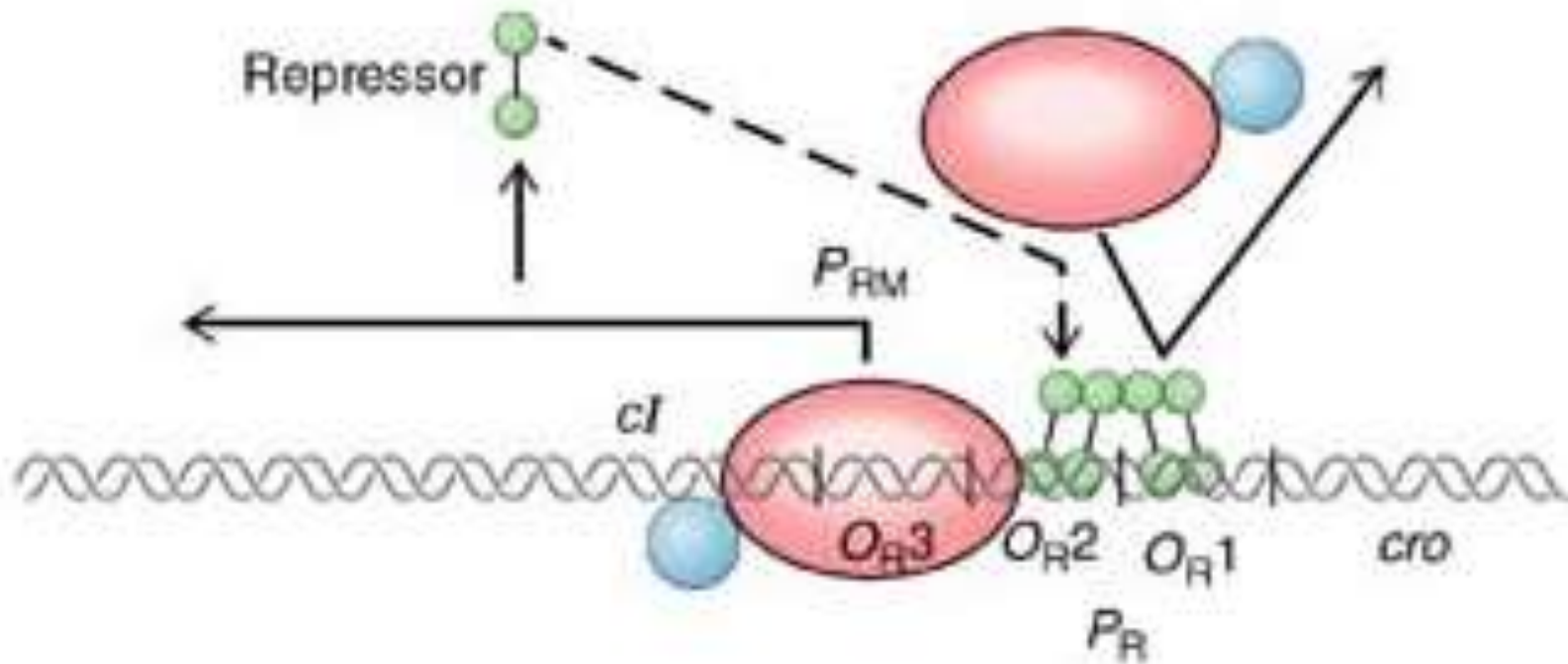
- **Cro**蛋白浓度升高可关闭**cI**基因，停止阻遏蛋白合成，有利于溶菌。
- **Cro**蛋白浓度升高可关闭**P<sub>L</sub>**和**P<sub>R</sub>**，**P<sub>R</sub>**在另一抗终止蛋白**Q**帮助下可结合**RNA pol**，向右进行晚期转录。

## 五、 $\lambda$ 噬菌体溶菌状态与溶原状态的协调调控

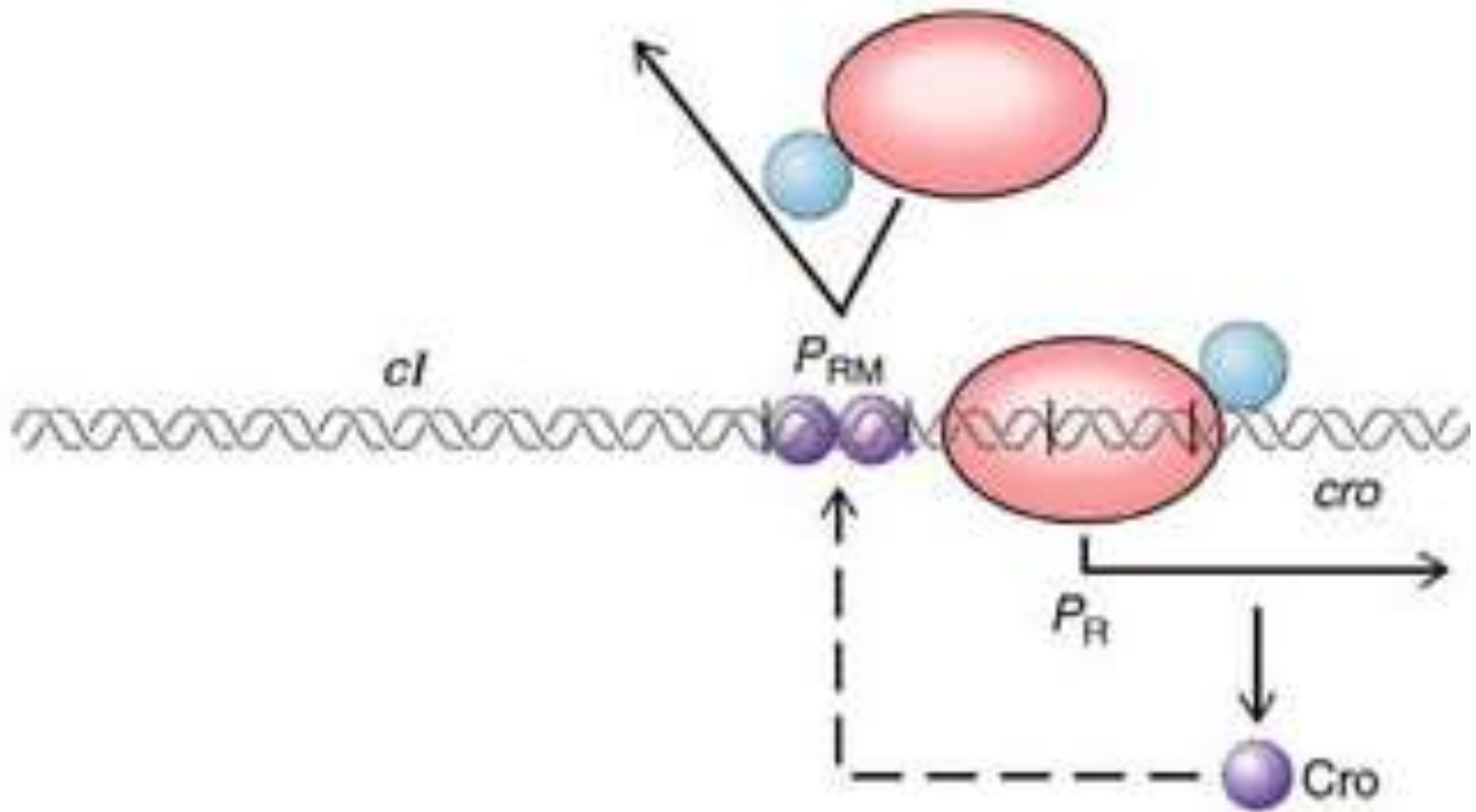


- **CI**阻遏蛋白合成增强，进入溶原生长状态；**CI**阻遏蛋白合成抑制，则进入溶菌生长状态。
- **Cro**蛋白抑制**CI**阻遏蛋白合成，**CII**蛋白促进**CI**合成。
- **CII**的表达受到宿主和 $\lambda$ 噬菌体表达的蛋白的双重调控。
- 细菌宿主合成的蛋白酶**FtsH**能特异降解**CII**蛋白； $\lambda$ 噬菌体合成的**CIII**蛋白能竞争结合**FtsH**，保护**CII**活性。

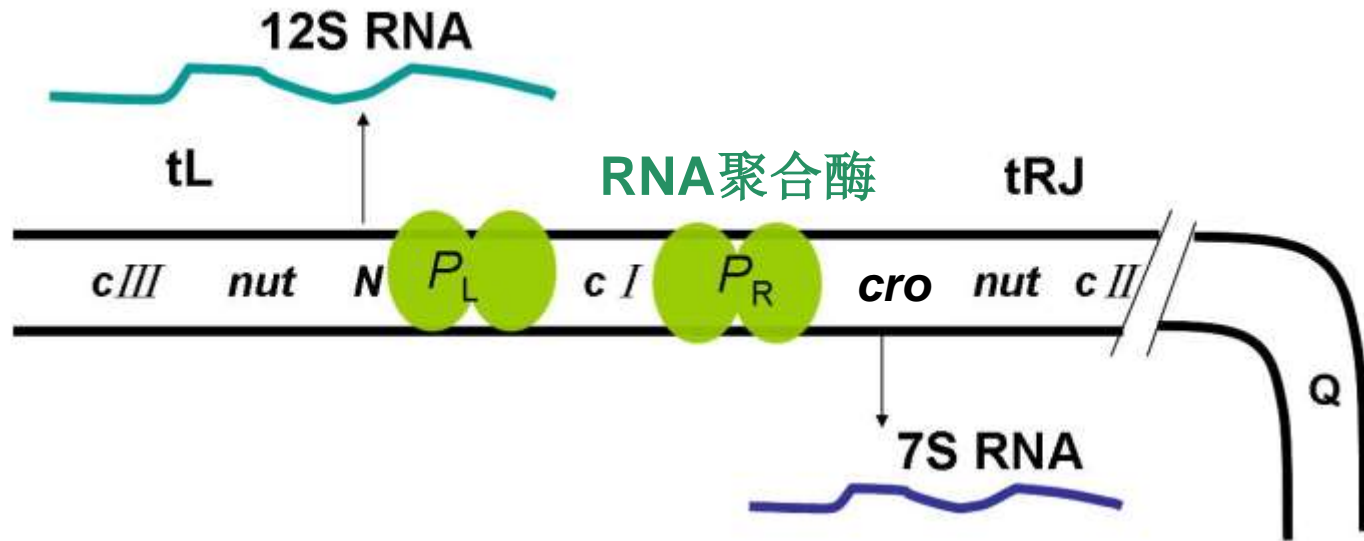
***CI***阻遏蛋白浓度高，进入溶原生长状态



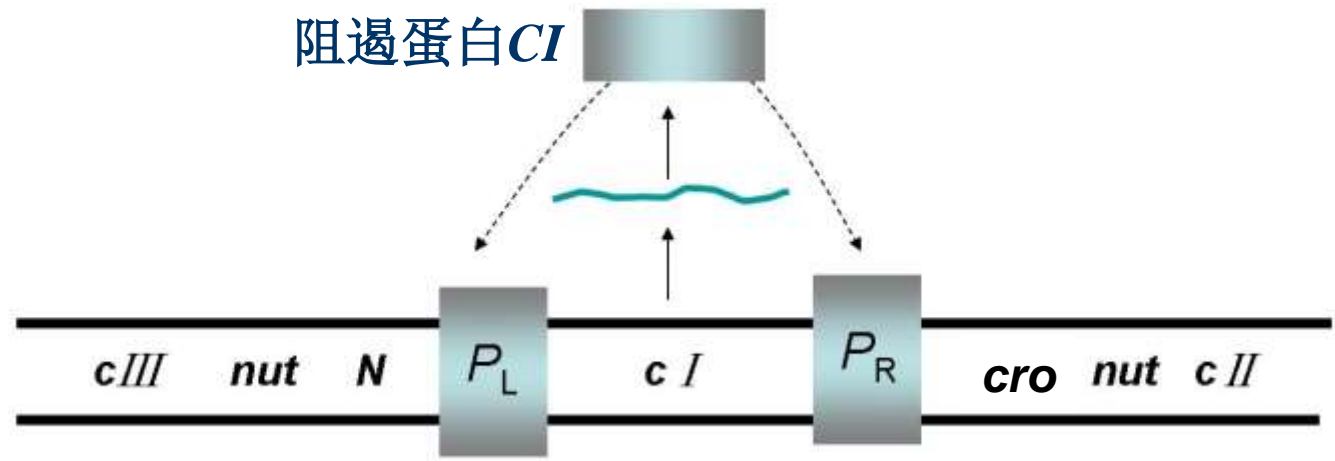
# *Cro*蛋白浓度高，进入溶菌生长状态



# 五、λ噬菌体溶菌状态与溶原状态的协调调控



溶菌



溶原

# 原核生物翻译水平的 基因表达调控

Regulation of Prokaryotic Gene  
Expression at Translation level



# 一、mRNA稳定性的调控



- **mRNA稳定性与RNase活性和mRNA的二级结构相关**
  - 原核生物mRNA分子某些片段，例如发夹有**RNase**抗性。
  - 细胞内有结合**RNA**，使之免受**RNase**降解的保护蛋白。
  - 近年发现，内源或外源的小分子**RNA**可特异互补结合细胞**RNA**，使其失去功能。

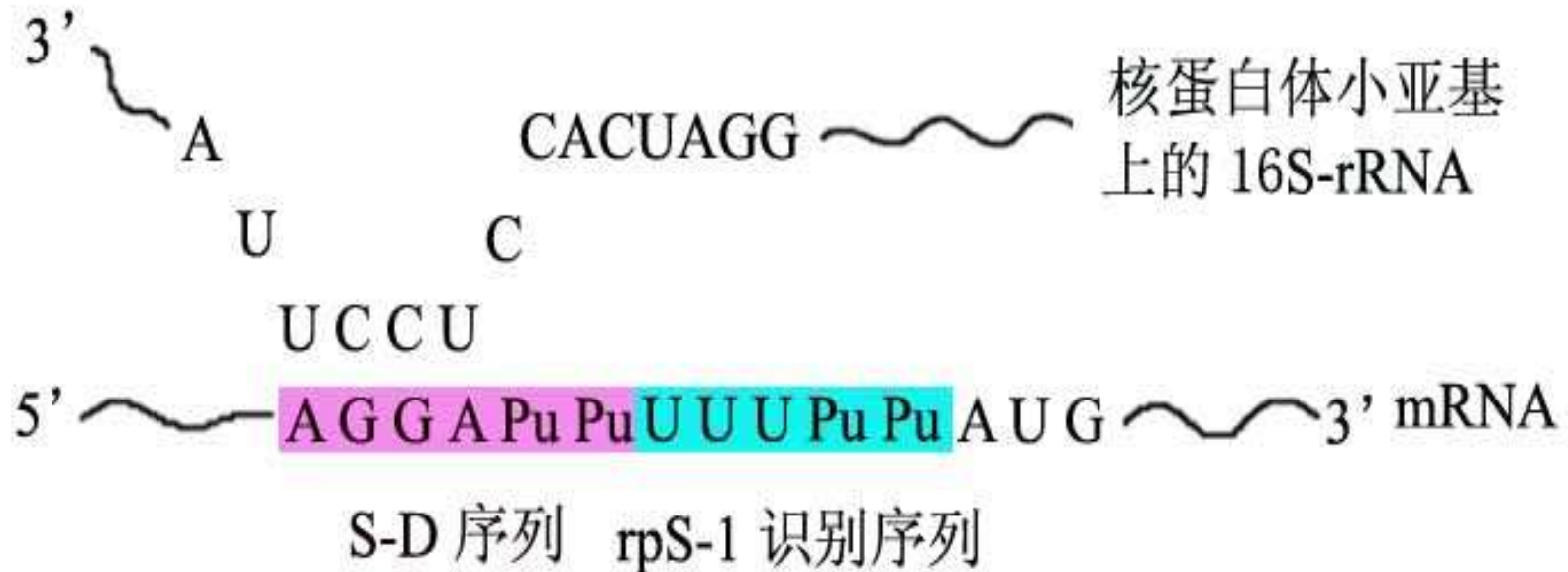


## 二、翻译起始的调控



- ❖ 在各种mRNA起始AUG上游约8~13核苷酸部位，存在一段由4~9个核苷酸组成的一致序列，富含嘌呤碱基，如-AGGAGG-，称为**Shine-Dalgarno序列(S-D序列)**，又称核糖体/核蛋白体结合位点(**ribosomal binding site, RBS**)。
- ❖ 一条多顺反子mRNA序列上的每个基因编码序列均拥有各自的**S-D序列**和起始**AUG**。

- 小亚基中的16S-rRNA 3'端有一富含嘧啶碱基的短序列，如-UCCUCC-，通过与S-D序列碱基互补而使mRNA与小亚基结合。
- 不同SD序列与16S-rRNA结合的效率影响翻译起始的效率



### 三、核蛋白体合成的调控



#### 核蛋白体蛋白与rRNA 合成是互相协调的

- 原核生物的**16S rRNA**与**21种核蛋白体蛋白(ribosomal proteins)**，简称**r-蛋白**，组成核蛋白体小亚基；**5S**和**23S rRNA**与**31种r-蛋白**组成大亚基。大、小亚基在翻译起始组合为**70S核蛋白体**。
- 蛋白质合成是生存的最基本需要，细胞必然要严格控制**rRNA**和**r-蛋白**的比例。



- **r-蛋白基因**在各个操纵子上转录为多顺反子

### 核蛋白体蛋白基因与RNA pol 亚基基因的多顺反子

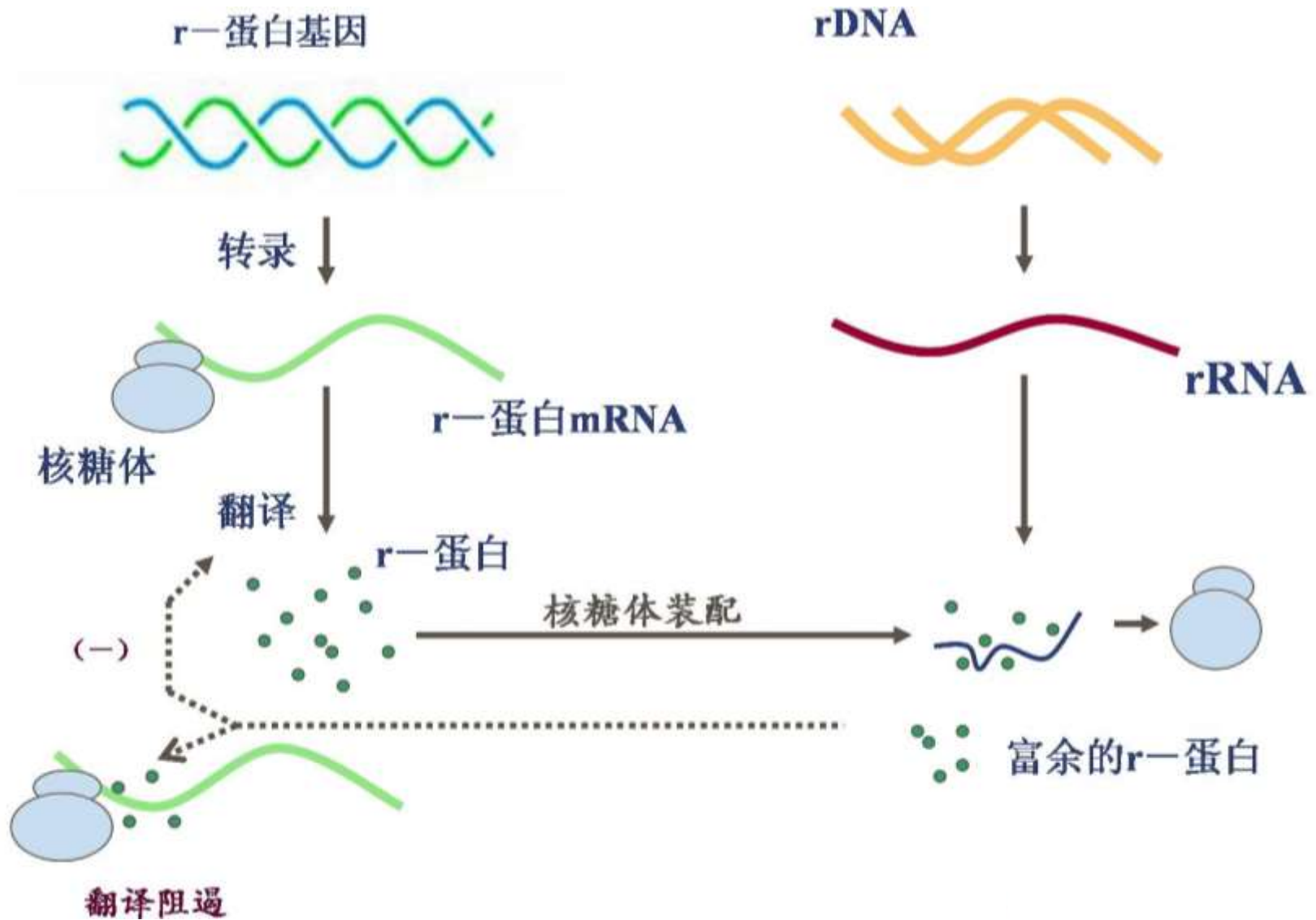
操纵子	基因簇	表达产物
<i>rif (rpoBC)</i>	<i>rpL-K-A-J-L-rpoB- rpoC</i>	L-11-1-10-12-RNApol-β-β'
<i>rpoA</i>	<i>rpsM-K-D-rpoA-rpL-Q</i>	S13-11-4-RNApol-O-L-17
<i>spc</i>	<i>rpL-N-X-E-rpsN-H-rpL-F-R- rpsE-rpL-D-O</i>	L14-24-5-S14-8-L6-18-S-5-L- 30-15



## 核蛋白体蛋白控制多顺反子mRNA的翻译

- ❖ 每个操纵子转录的多顺反子mRNA所编码的蛋白质中都有一种蛋白质（或两种蛋白质形成的一个复合物）可以结合到mRNA上游的一个特定部位，阻止核蛋白体结合和起始翻译。
- ❖ 蛋白质作用于自身mRNA，抑制自身的合成，称为自我调节（autogenous control）。

# r-蛋白和rRNA合成的相互配合



## 四、反义RNA的调控



- 细菌中含有与特定mRNA翻译起始部位互补的RNA，通过与mRNA杂交阻断30S小亚基对起始密码子的识别及与SD序列的结合，抑制翻译起始。这种调节称为**反义控制(antisense control)**。



# 反义RNA的作用机制



1. 反义RNA直接作用于靶mRNA的SD序列和/或编码区，抑制翻译起始；或反义RNA与靶mRNA结合后对RNase的敏感性增加，导致mRNA降解。
2. 反义RNA与靶mRNA的SD序列上游的非编码区结合，引起mRNA核蛋白体结合区域的二级结构变化，阻止mRNA与核蛋白体的结合。
3. 反义RNA可直接抑制靶mRNA的转录，减少mRNA的生成。

# Key points

## ❖ 操纵子(operon)

启动子(promoter, P)

操纵序列(operator, 阻遏蛋白结合位点)

阻遏蛋白

正调控蛋白结合位点

## ❖ 单顺反子mRNA; 多顺反子mRNA

## ❖ 乳糖操纵子的阻遏蛋白负调控, CAP正调控

# Key points



- ❖ 色氨酸操纵子(*trp* operon)产物阻遏负调控, 转录衰减(attenuation)调控
- ❖ 原核生物翻译水平的基因表达调控  
反义控制
- ❖ **Lambda** 噬菌体的基因表达调控  
溶菌生长途径(lysis pathway)  
溶原生长途径(lysogenic pathway)