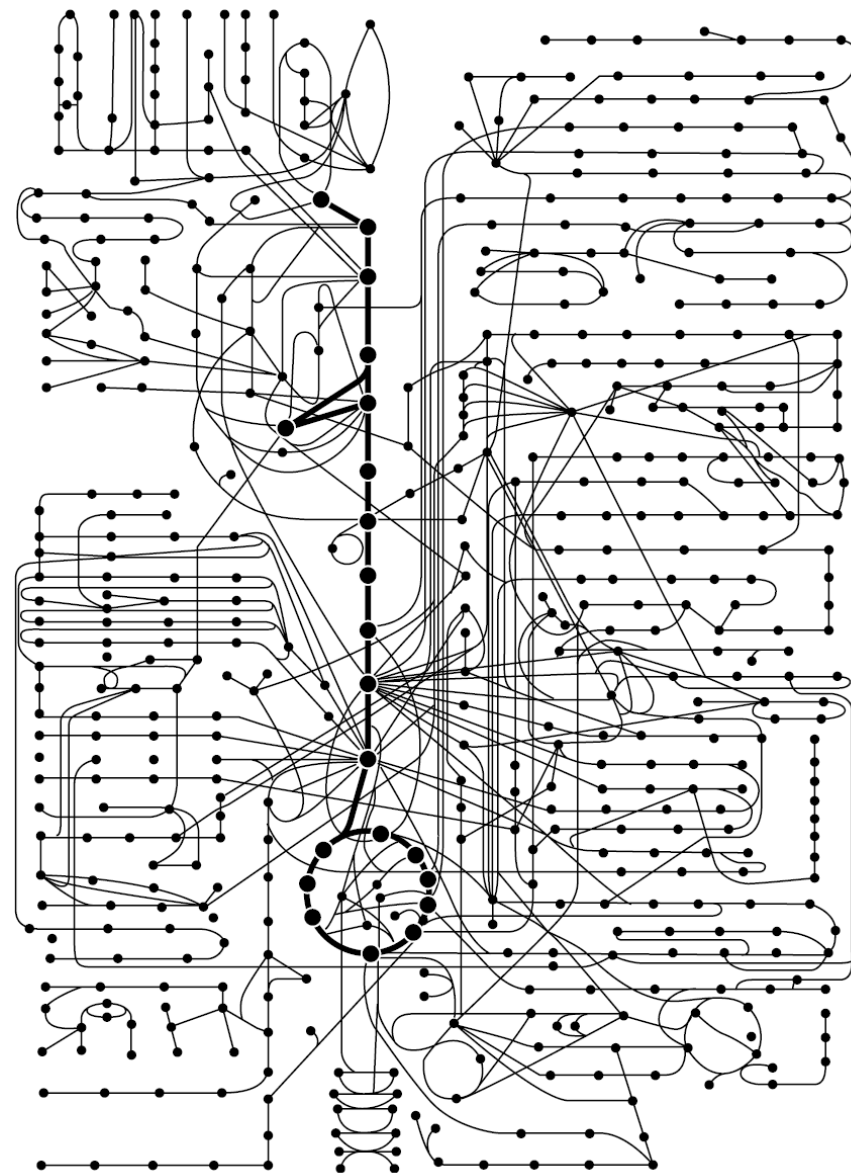
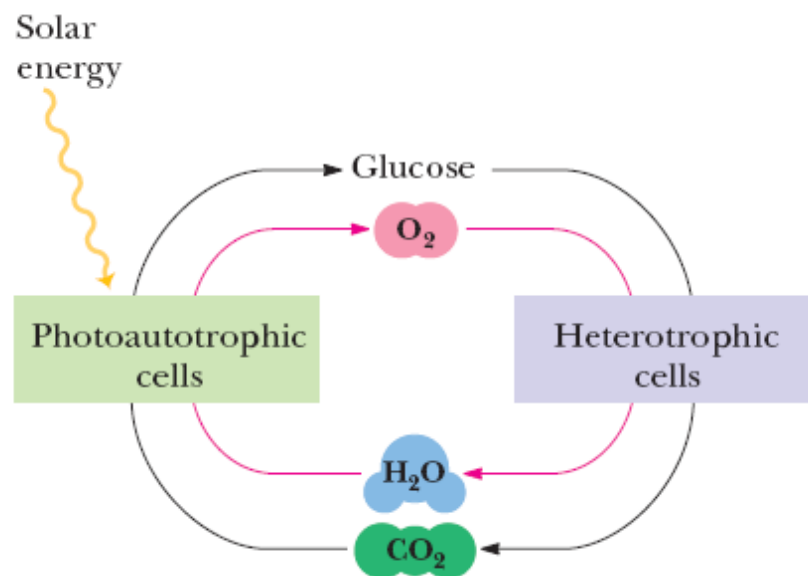


# 第七章 代谢

## *Metabolisms*



# 本章主要内容（10学时）

---

一. 代谢总论（重点）

二. 糖的分解代谢（重点）

三. 光合作用（重点）



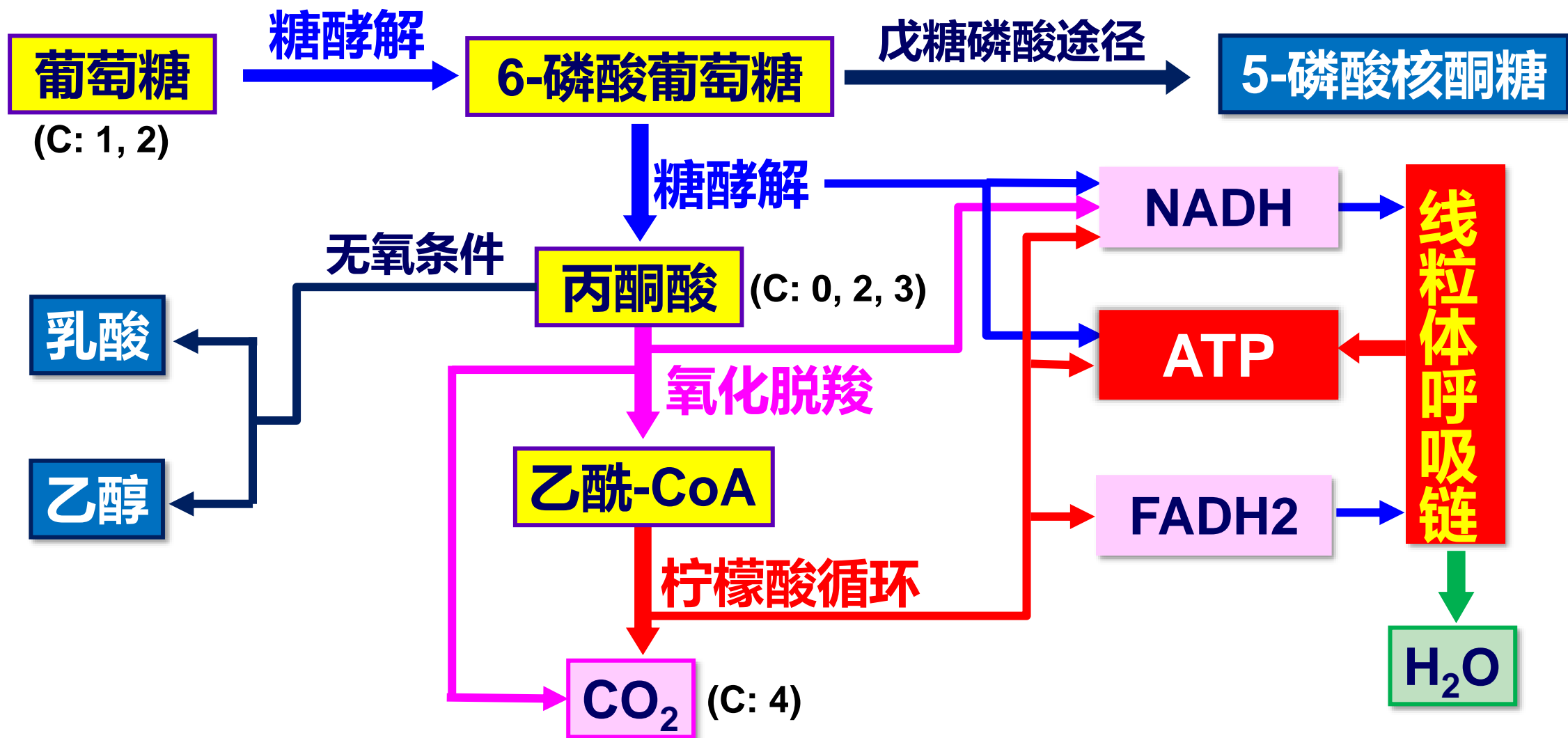
四. 脂类代谢（重点）

翻转课堂：15周周三

五. 蛋白质降解和氨基酸代谢（重点）

六. 核酸降解和核苷酸代谢（自学）

# 上次课内容回顾



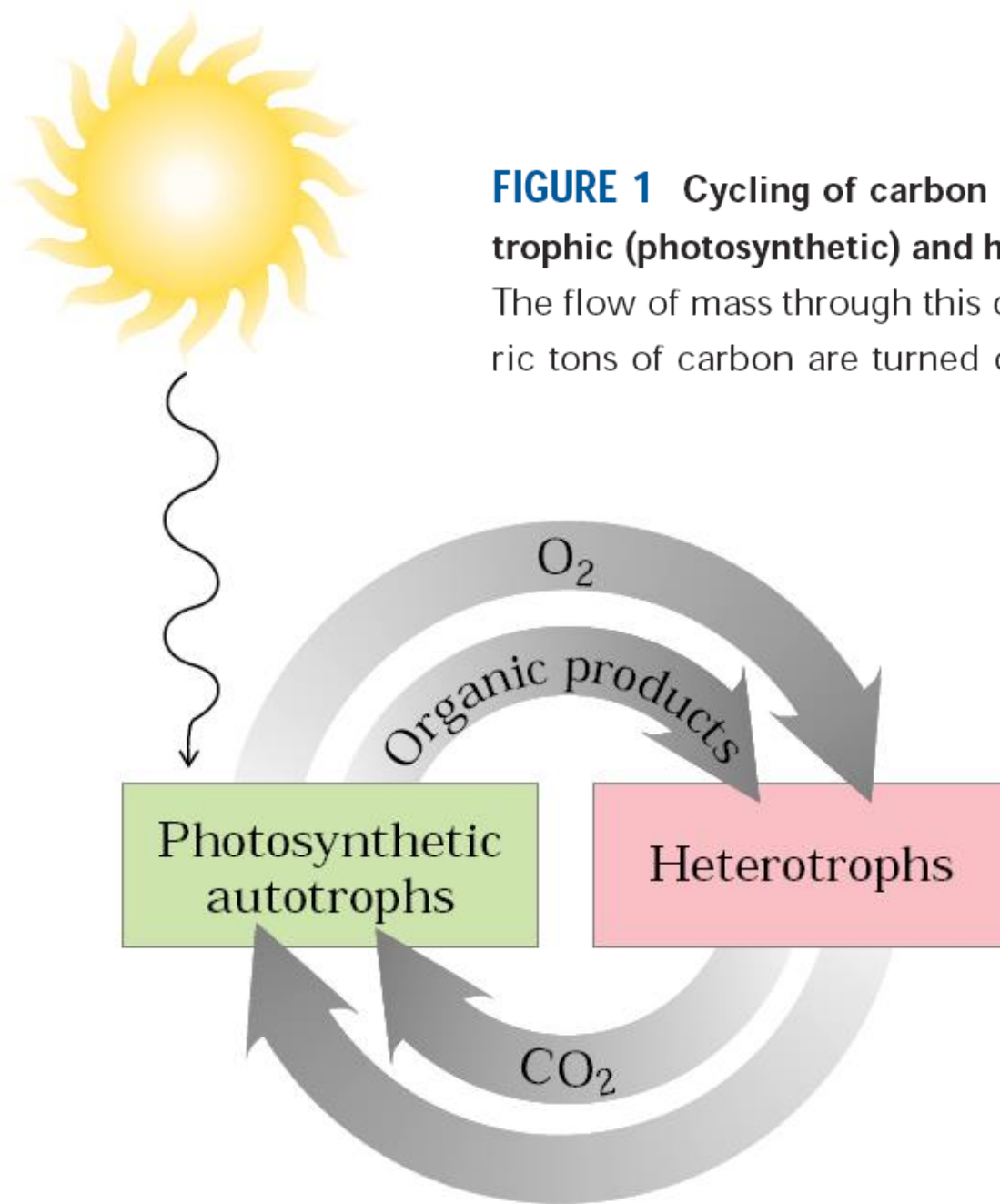
# 三、光合作用 (Photosynthesis)

## 1. 光合作用的概念

---

- **光能** — 生物界能量的最终来源。
- **光养生物** (prototroph, 又称自养生物, auxotroph):  
能直接利用光能, 将 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 合成有机物。
- **化养生物** (chemotroph, 又称异养生物, heterotroph):  
以富能的有机物为食物, 通过氧化分解有机物所释放的能量维持生命活动。

# 自然界的二氧化碳和氧气的循环



**FIGURE 1** Cycling of carbon dioxide and oxygen between the autotrophic (photosynthetic) and heterotrophic domains in the biosphere. The flow of mass through this cycle is enormous; about  $4 \times 10^{11}$  metric tons of carbon are turned over in the biosphere annually.

# 三、光合作用

## 1. 光合作用的概念

---

- 是糖合成代谢的主要途径。
- **光合作用**：是指绿色植物等以 $\text{CO}_2$ 为碳源，水为供氢体，利用叶绿素分子捕获的光能为能源，合成以糖类物质为主的有机化合物，同时释放出氧气的过程。
- 光合作用的总反应式可表示如下：



# 三、光合作用

## 2. 叶绿体

- 进行光合作用的场所

- 叶绿体结构：

外膜

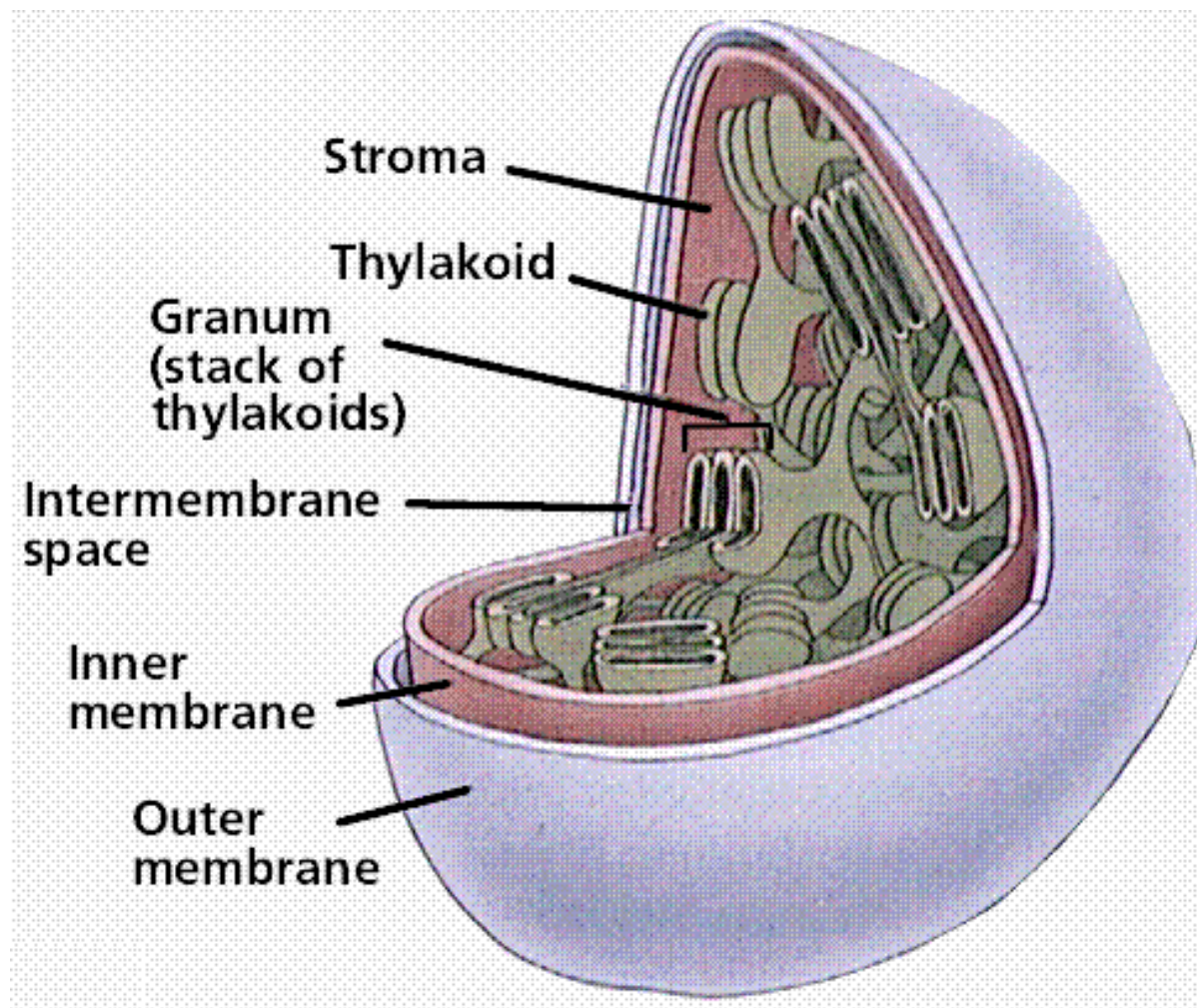
内膜

膜间腔

基质(stroma)

类囊体(thylakoid)

基粒(granum)



## 2. 叶绿体

---

### 叶绿体中的主要组成:

- **蛋白质**: 约50%，光合作用必需的全部酶类都存在于叶绿体中。
- **叶绿素(chlorophyll)**: 主要的光合色素，约占23%。是捕获光能的主要组分。
- **叶绿体膜**: 是双层脂膜，与线粒体膜相似，在电子传递和能量转化过程中起重要作用。
- **质体醌(plastoquinone)**: 与CoQ类似，起电子传递中间体的作用。

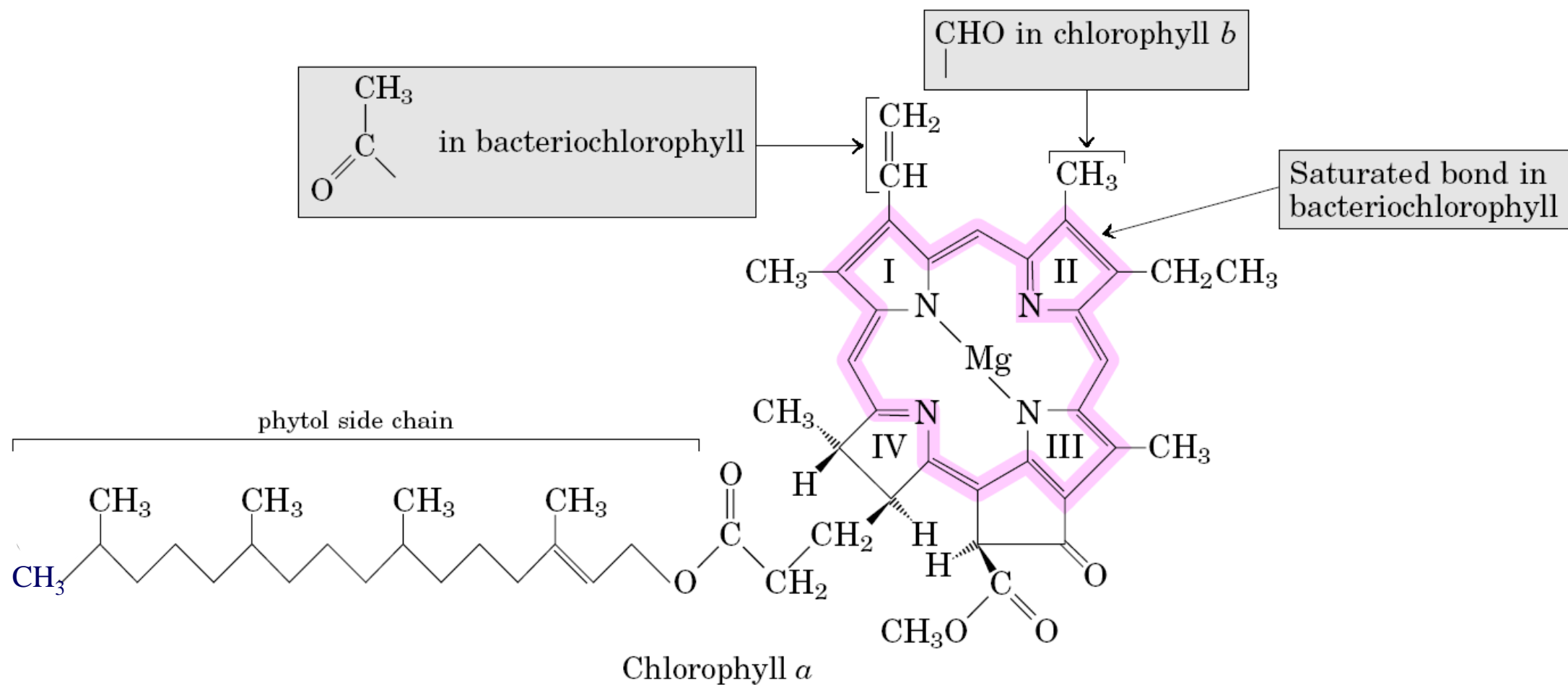


# 叶绿素 (chlorophyll)

---

- **主要光合色素：叶绿素a和叶绿素b。**  
(其它光合色素：类胡萝卜素、叶绿素c、藻胆色素等)
- **镁卟啉衍生物**，带羧基的侧链与一个含有20个碳的植醇形成酯。叶绿素a与b之间的差别在于吡咯环上的一个基团不同。
- **不同的叶绿素分子，其UV特征吸收不同：**
  - 叶绿素a：680 nm (蓝绿)
  - 叶绿素b：460 nm (黄绿)

# 叶绿素的结构



# 叶绿素以**缀合蛋白质**形式存在于光合膜（类囊体膜）中

---

- 高等植物和藻类中，叶绿素与蛋白质形成复合体 — **缀合蛋白质**
- 根据复合体作用不同，分为：
  1. **集光复合体**（light-harvesting complex, LHC）：是光系统的天线，因此又将这种叶绿素称作**天线色素**（antenna pigment）
  2. **光系统I复合体**（photosystem I complex）
  3. **光系统II复合体**（ photosystem II complex ）
- 每种光系统有相应的LHC，即**LHC-I** 和 **LHC-II**。

# 集光复合体II (LHC-II) 单体的结构

## ■ 功能单位:

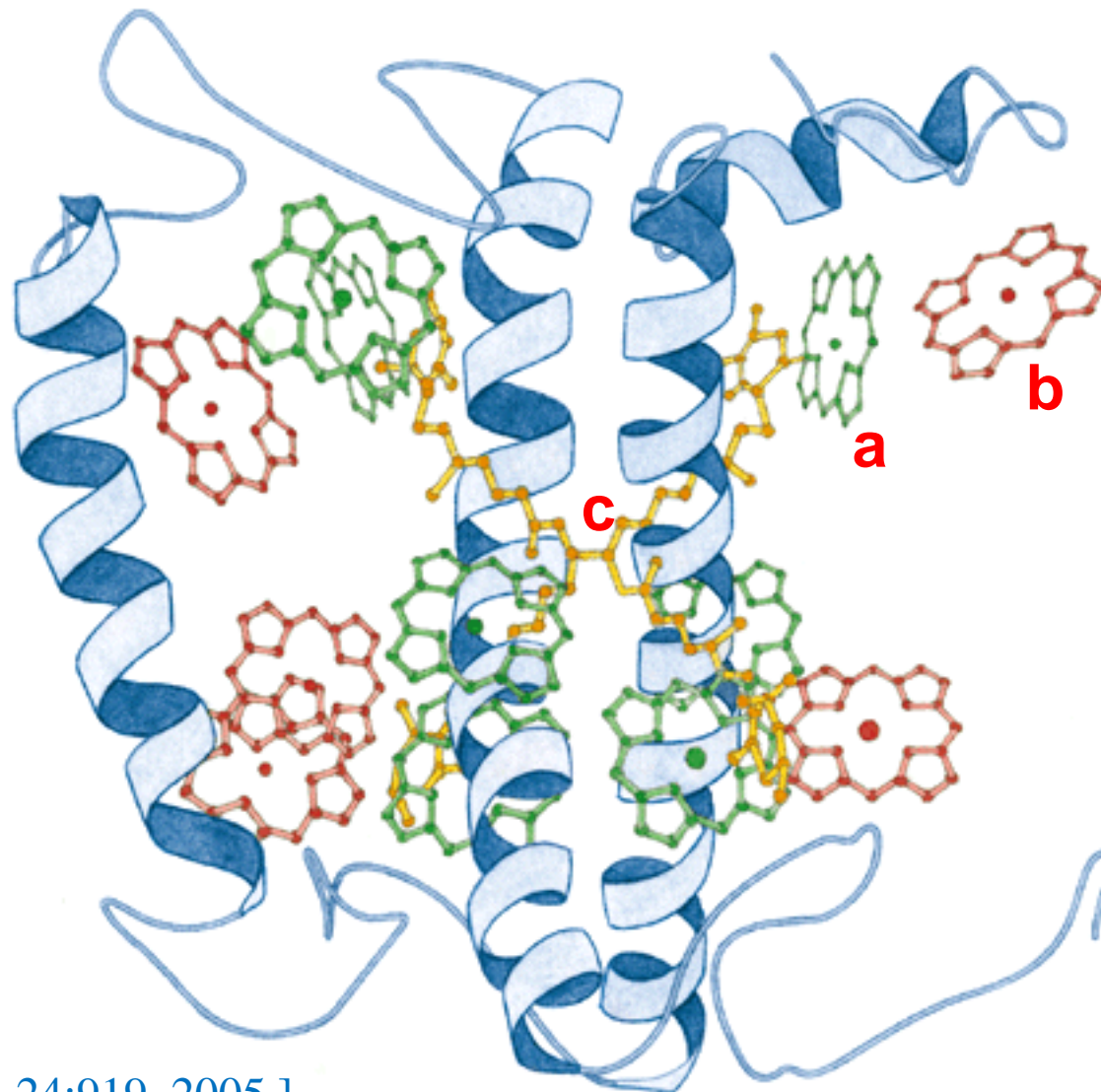
LHC-II三聚体

## ■ 每个单体:

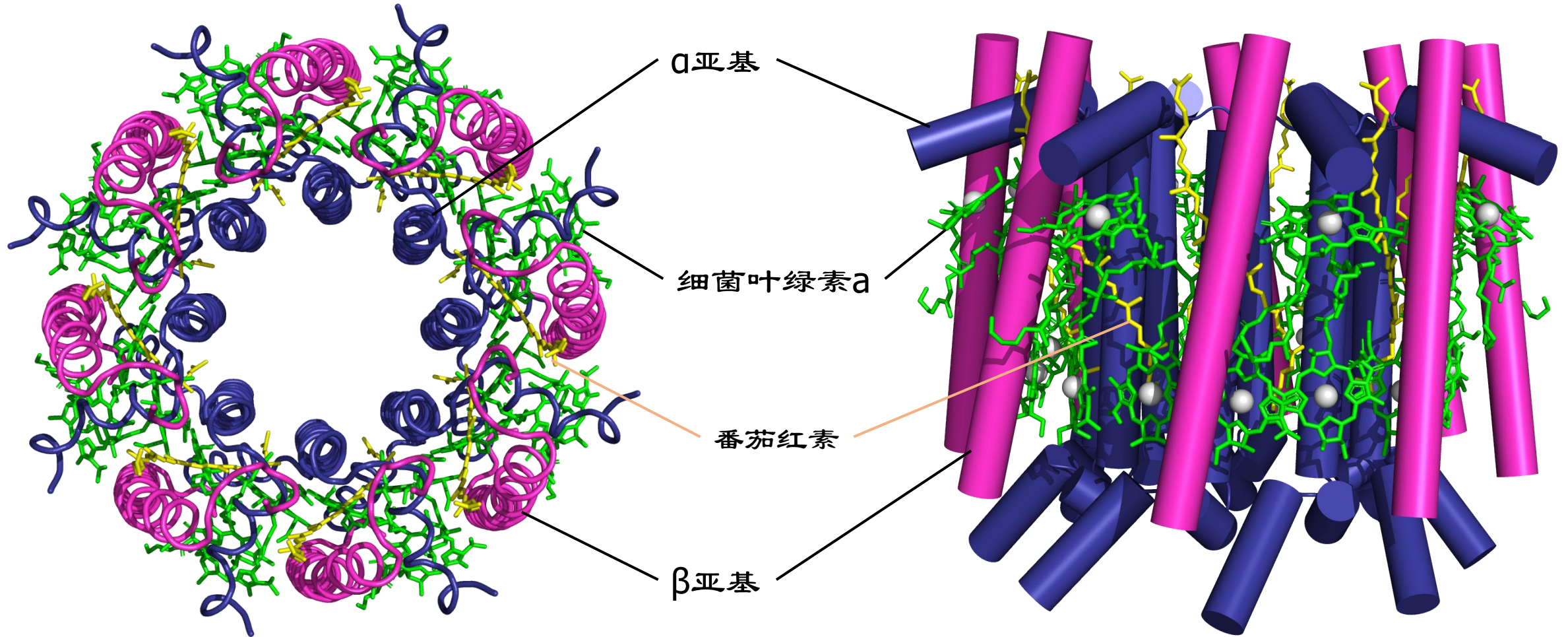
7 个叶绿素a (green)

5 个叶绿素b (red)

2 个叶黄素 (yellow)



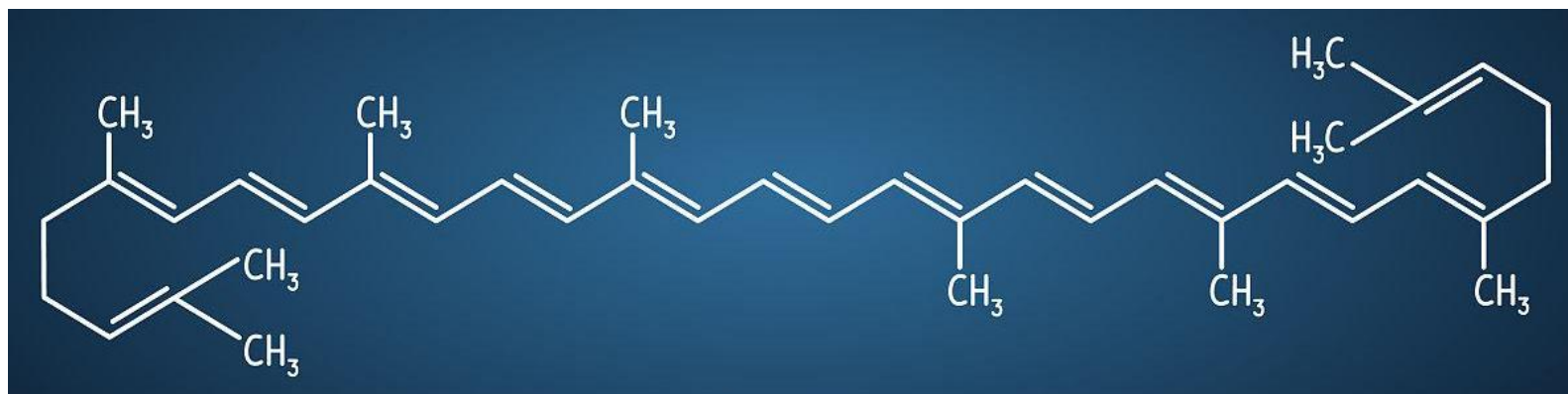
# X-Ray structure of the light-harvesting complex LHC-II from *Rs. Molischianum* (PDB ID: 1LGH)(莫氏红螺菌)



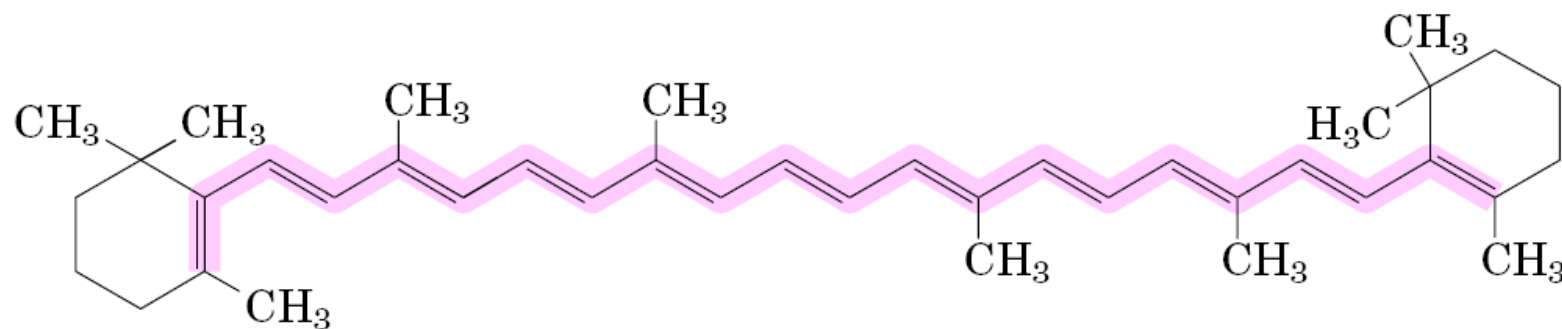
The  $\alpha$  subunits (*blue*; 56 residues) and the  $\beta$  subunits (*magenta*; 45 residues), as represented by their  $C\alpha$  backbones, are arranged in two concentric eightfold symmetric rings. Twenty-four bacteriochlorophyll *a* (BChl *a*; *green*) and eight **lycopene (番茄红素)** (a carotenoid; *yellow*) molecules are sandwiched between the protein rings.



番茄红素

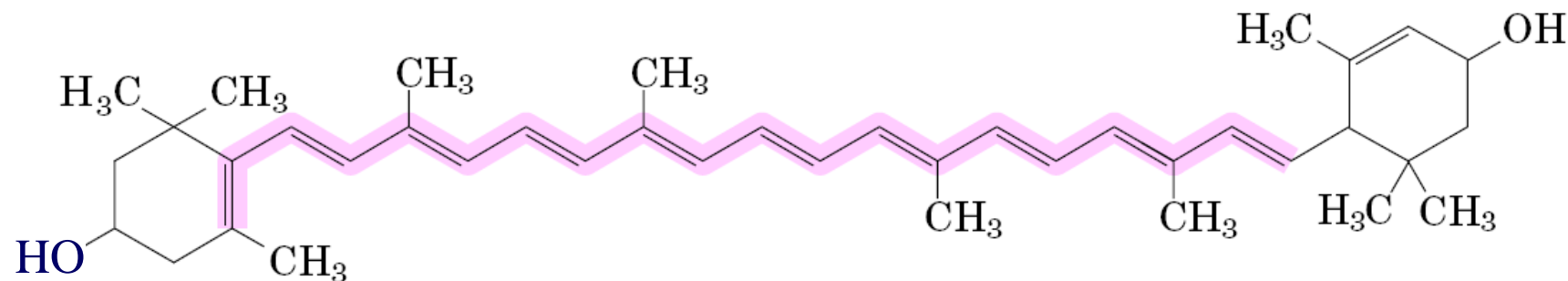


$\beta$ -胡萝卜素



$\beta$ -Carotene

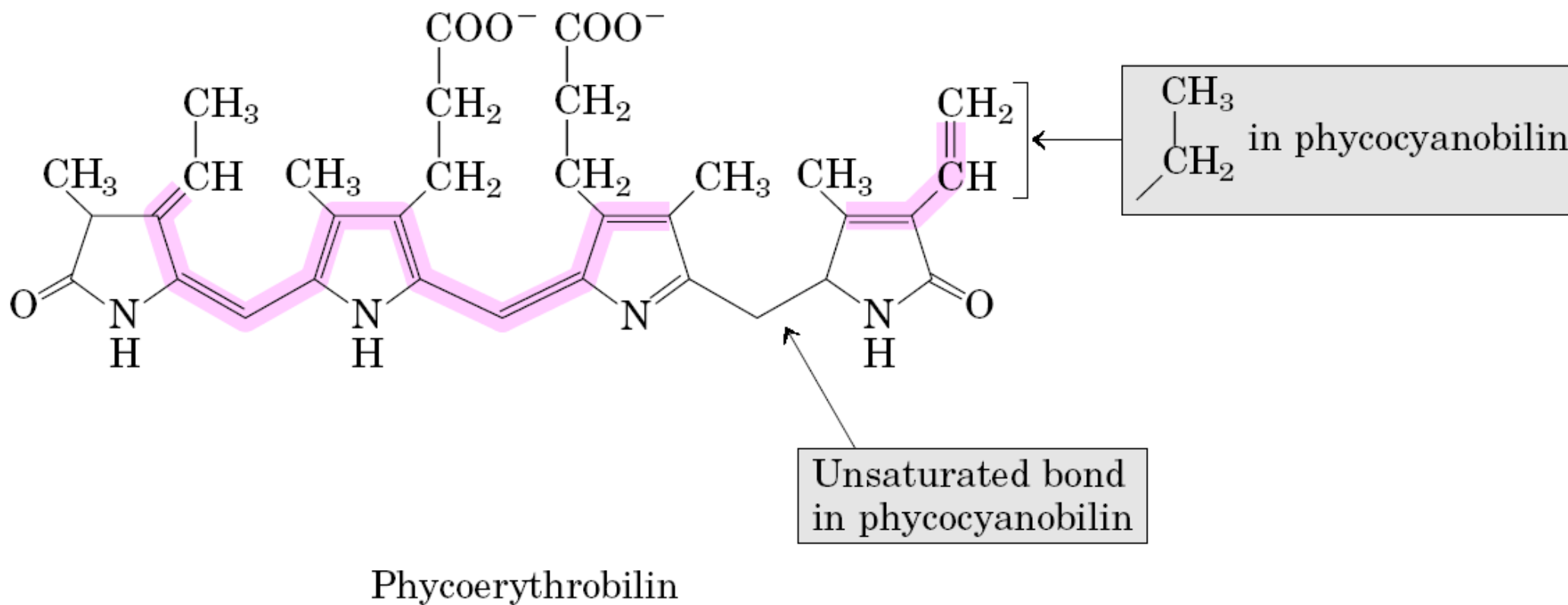
叶黄素



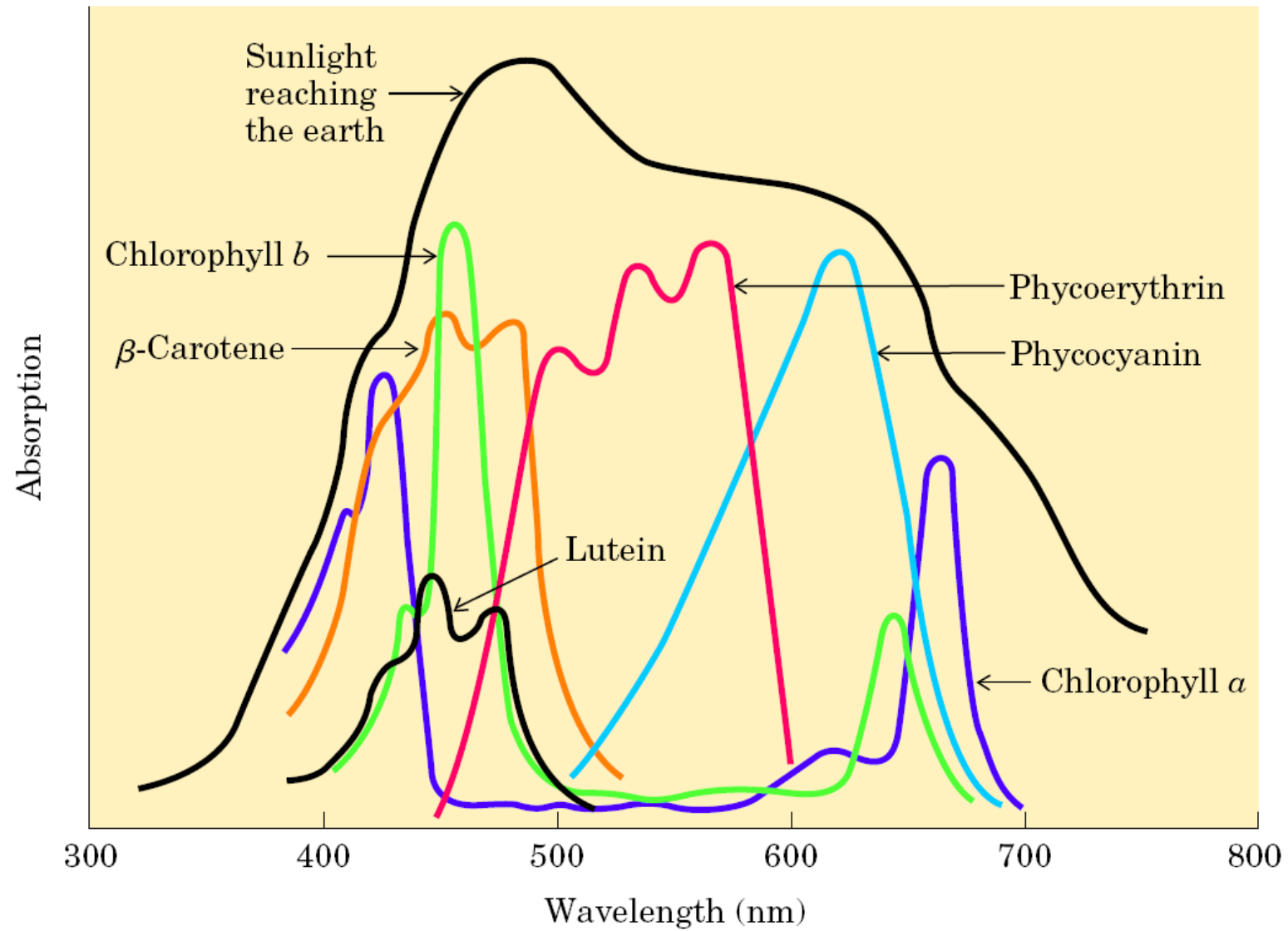
Lutein (xanthophyll)

# 藻胆色素 (phycobilins) 的结构

- 在藻青蛋白和藻红蛋白分子中含有藻胆色素。



# UV spectra





# 三、光合作用

## 3. 光反应和暗反应

光合作用的两个主要步骤：光反应和暗反应

### 光反应 (light reaction)

- ① 水的光解：  $\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- + 1/2\text{O}_2\uparrow$
- ② 光合磷酸化：  $\text{ADP} + \text{Pi} \longrightarrow \text{ATP}$
- ③ NADPH合成：  $\text{NADP}^+ + 2\text{e}^- + \text{H}^+ \longrightarrow \text{NADPH}$

# 三、光合作用

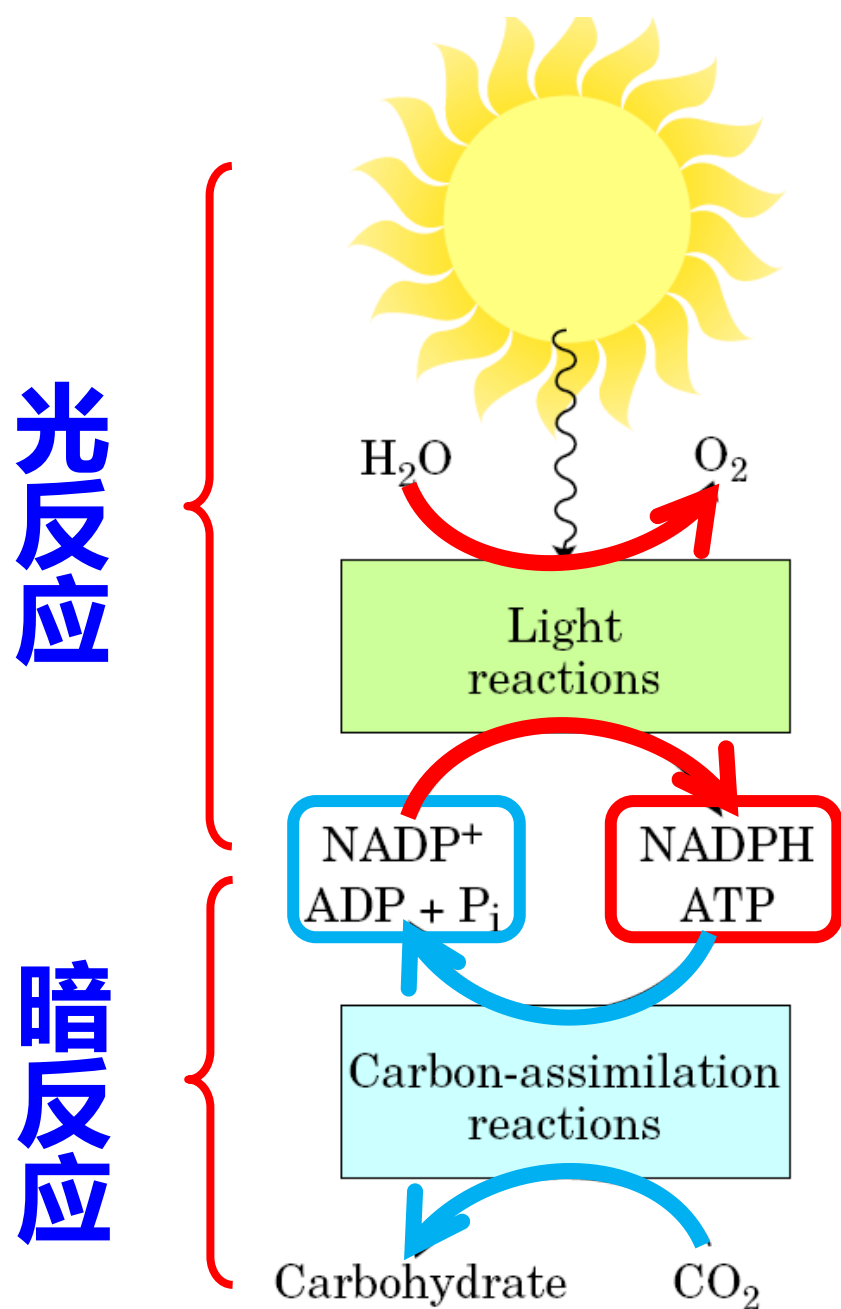
## 3. 光反应和暗反应

光合作用的两个主要步骤：光反应和暗反应

### 暗反应 (dark reaction)

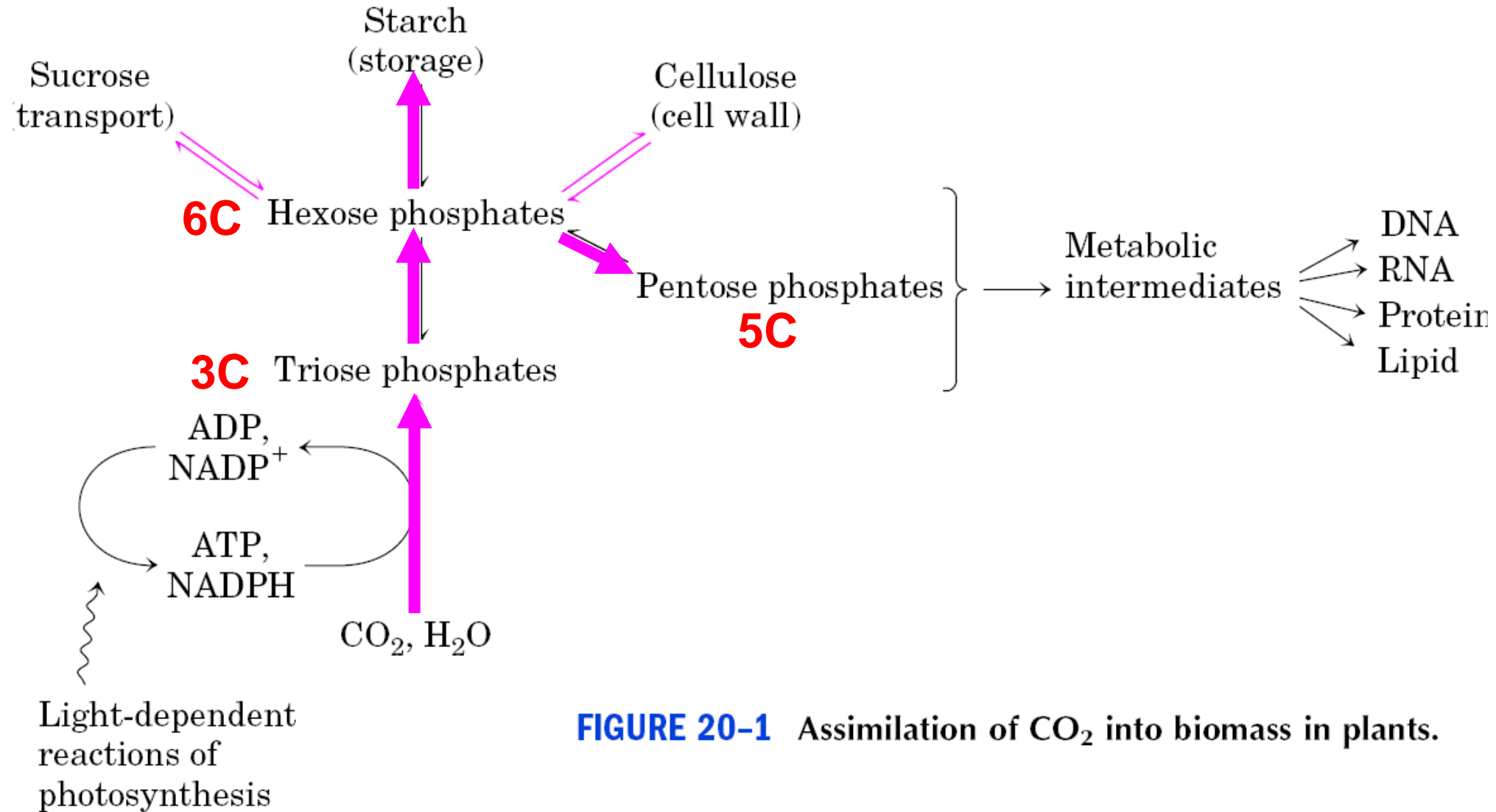
二氧化碳的固定和还原，生成己糖的过程：





**FIGURE 19-37** The light reactions of photosynthesis generate energy-rich NADPH and ATP at the expense of solar energy. These products are used in the carbon-assimilation reactions, which occur in light or darkness, to reduce  $CO_2$  to form trioses and more complex compounds (such as glucose) derived from trioses.

# 植物体中CO<sub>2</sub>的同化

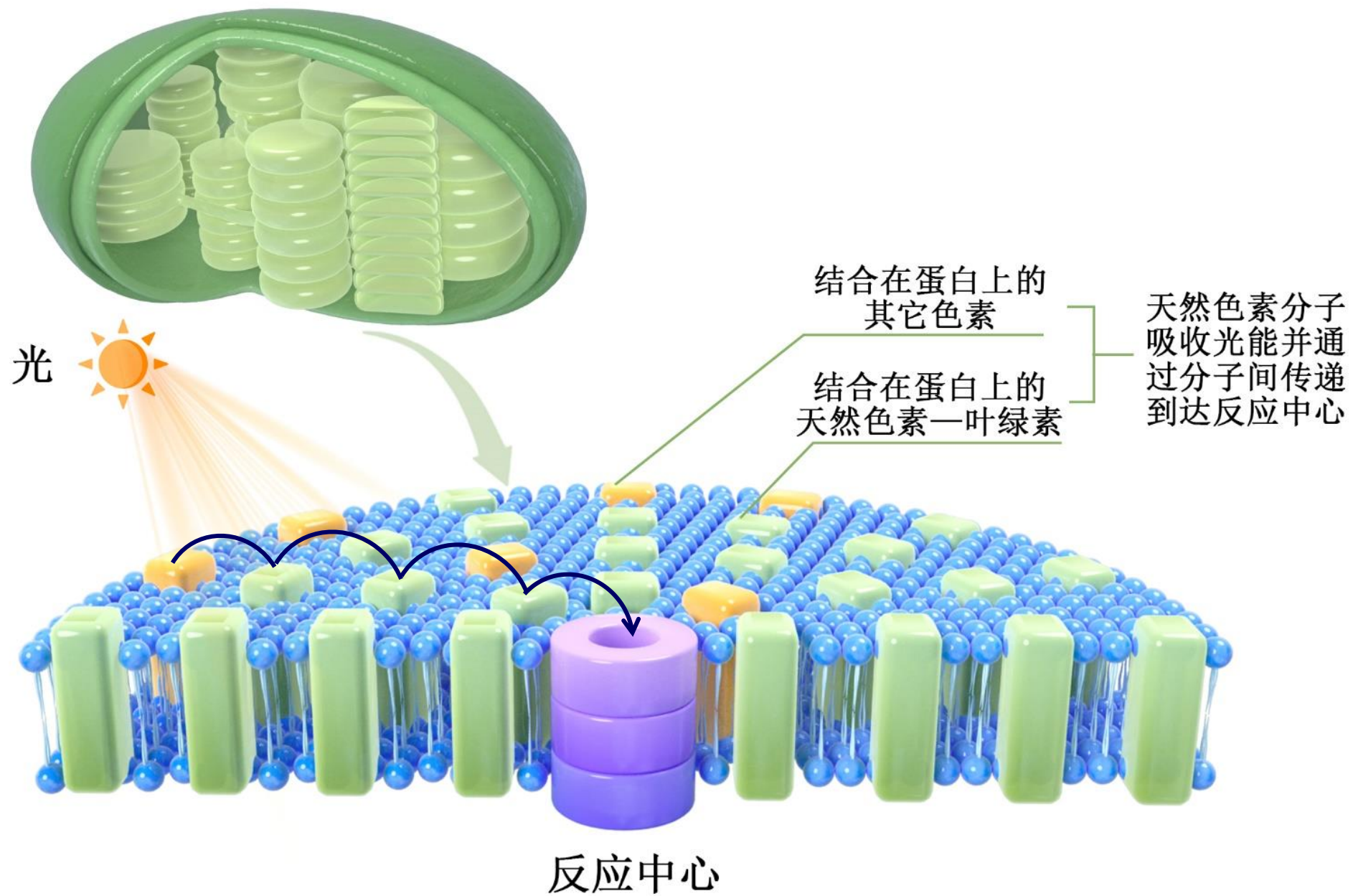


# 三、光合作用

## 4. 光反应机制

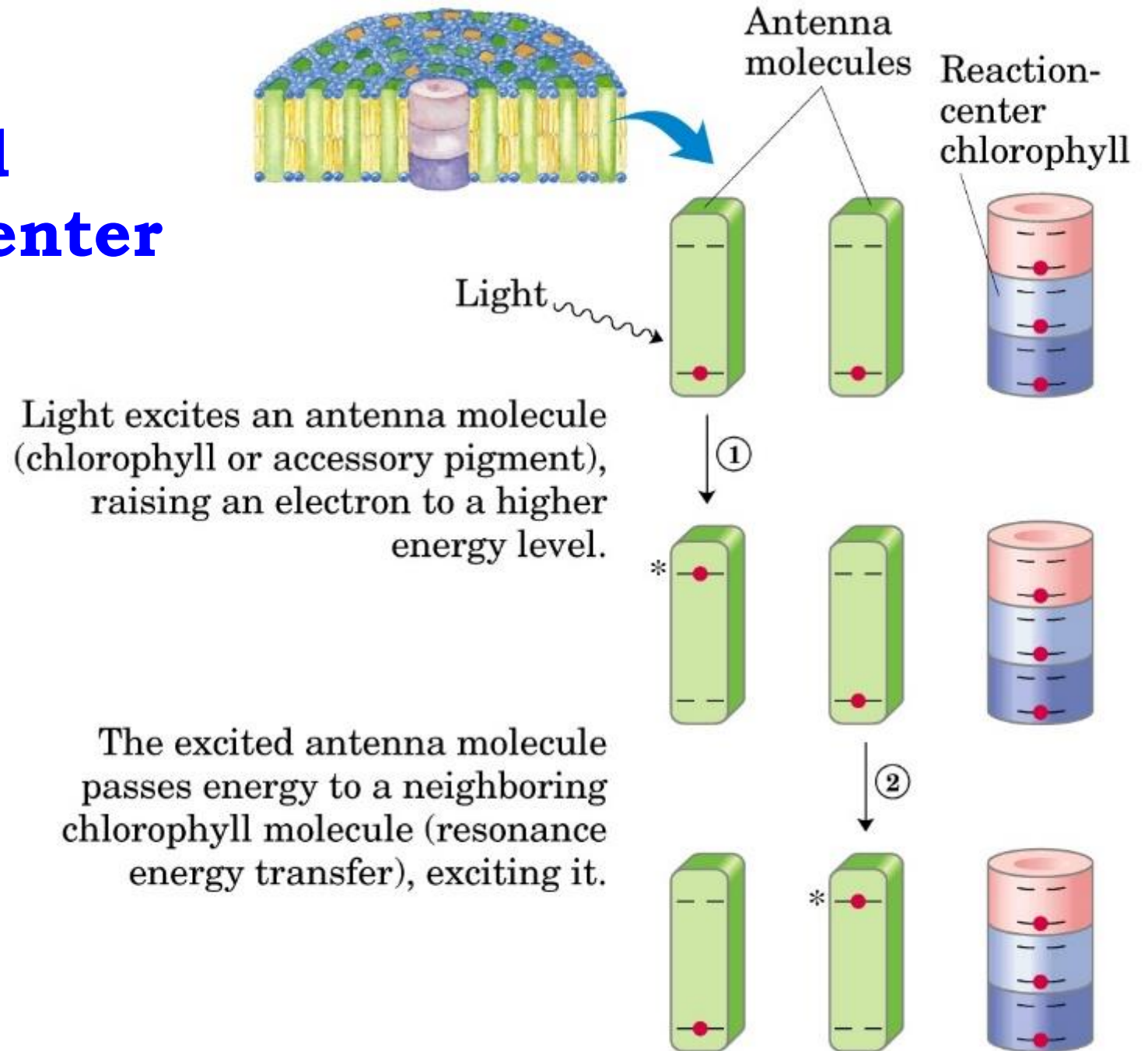
---

- 由**光系统I (PS I)** 和**光系统II (PS II)** 共同完成。
- 所有放氧的光合细胞中，叶绿体**类囊体膜**中都包含有PS I 和PS II。
- PS I 和PS II各含有**作用中心或反应中心 (reaction center)** 。
- 天线色素与反应中心共同完成**光能的捕集与电子的激发**。



发生光化学反应，即光能驱动下的电荷分离，引发电子流动

# Antenna and Photoreaction Center





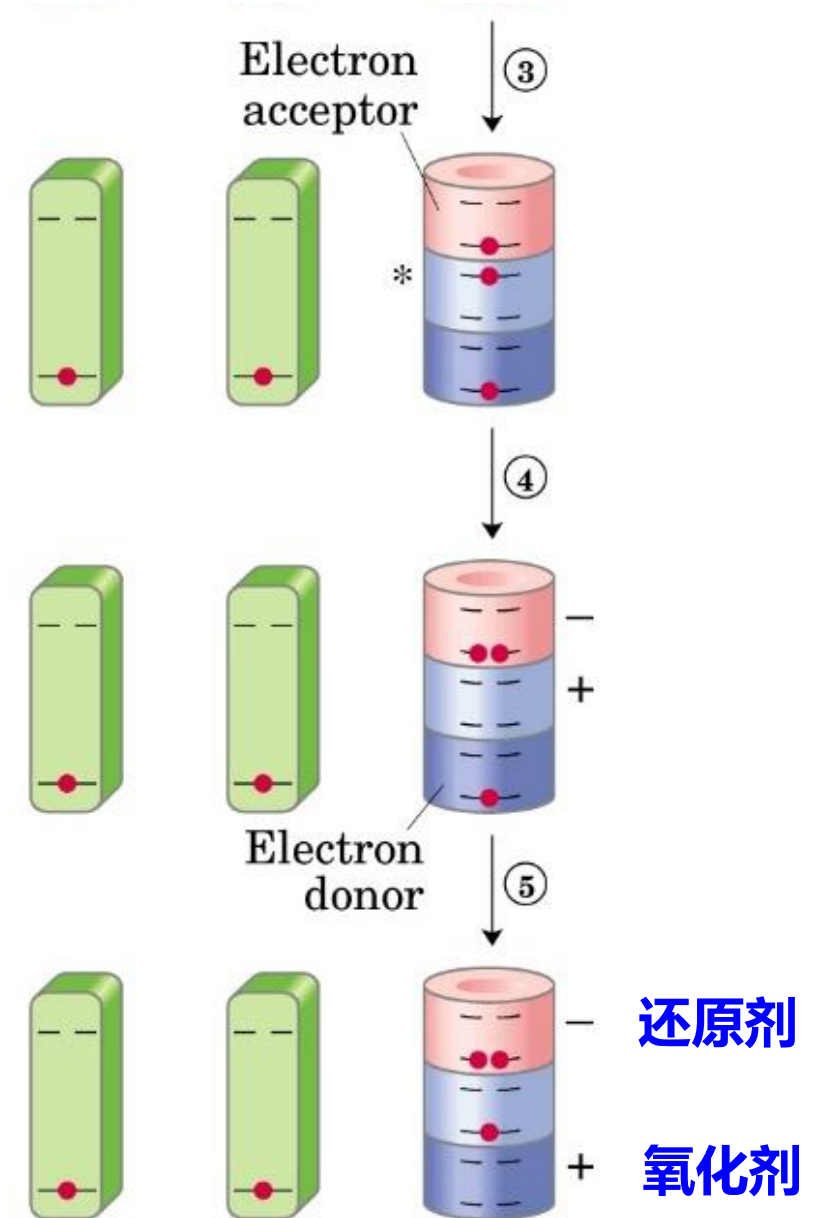
# Antenna and Photoreaction Center

This energy is transferred to a reaction-center chlorophyll, exciting it.

The excited reaction-center chlorophyll passes an electron to an electron acceptor.

The electron hole in the reaction center is filled by an electron from an electron donor.

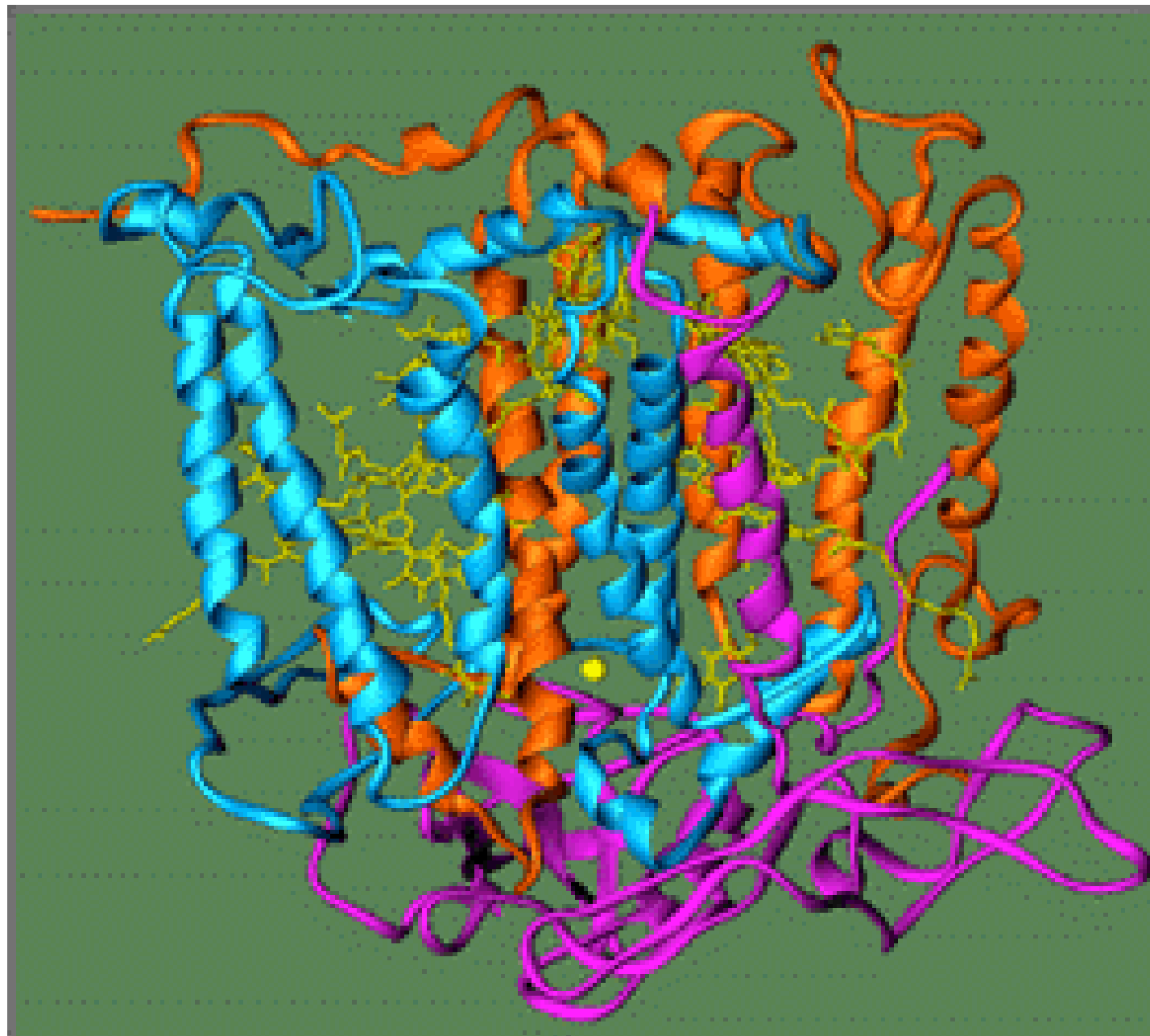
光子的吸收引起了  
光反应中心电荷的分离



The absorption of a photon has caused separation of charge in the reaction center.

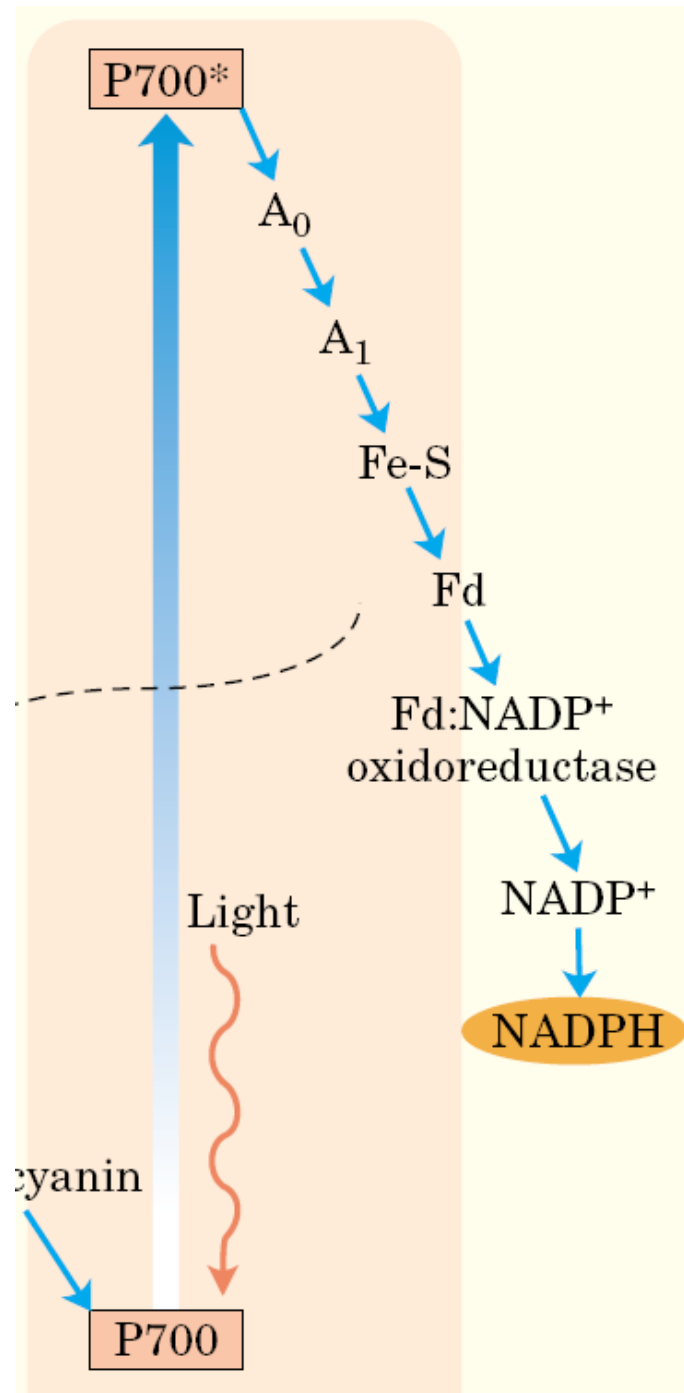


# 光反应中心



# ① PS I 的作用特点

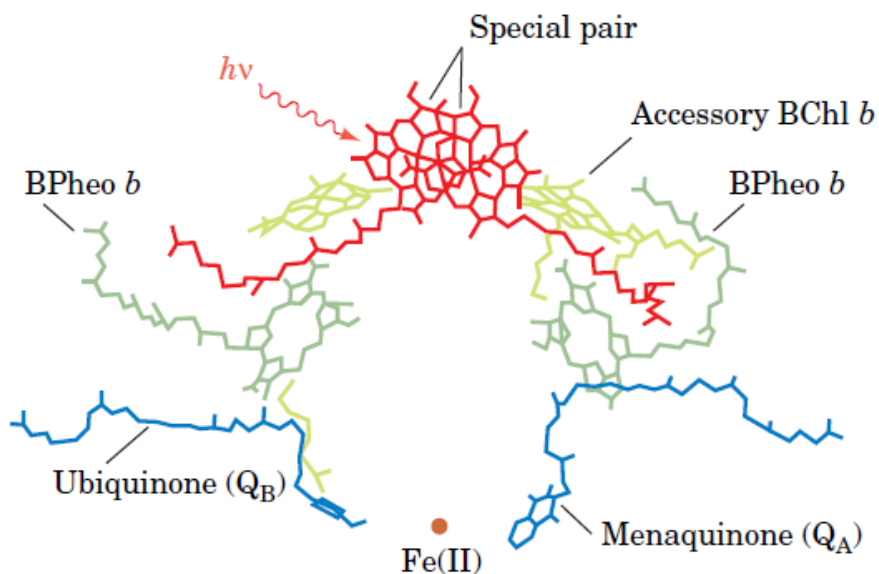
1. 能被 $<700\text{ nm}$ 的光激发，并对 $700\text{ nm}$ 的光有最大吸收，其作用中心色素称为**P-700**。
2. **电子加压站。**
3. 受体 $A_0$ (一种叶绿素) 接受 P-700的高能电子，通过叶绿醌 $A_1$ ，铁氧还蛋白 (Fd) 等，在Fd-NADP<sup>+</sup>还原酶 (FNR) 作用下，将NADP<sup>+</sup>**还原**成NADPH。



## ② PS II 的作用特点

---

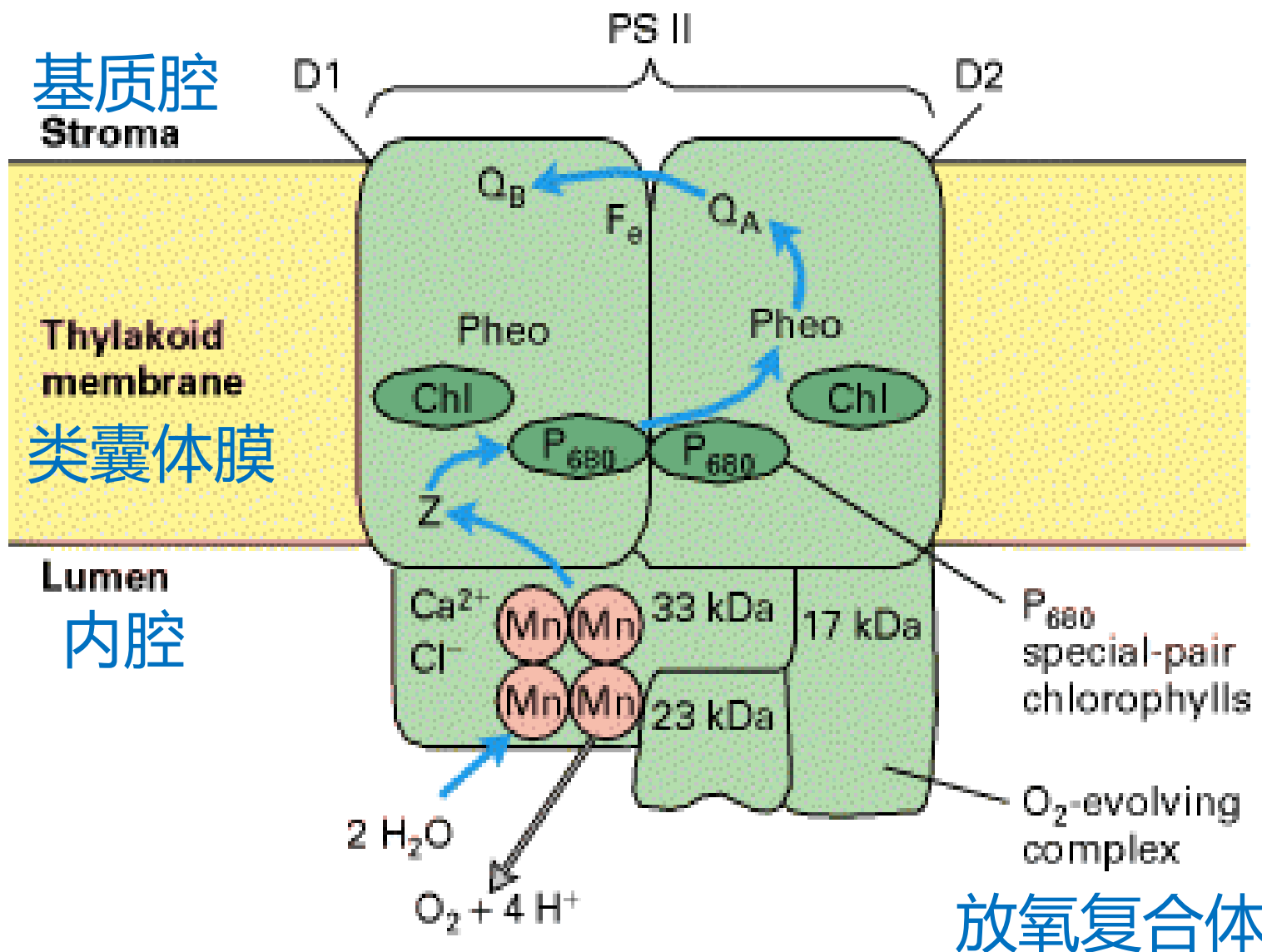
1. 能被  $< 680\text{ nm}$  的光激发，对波长为  $680\text{ nm}$  的光有最大吸收，其作用中心色素称为 **P-680**。
2. **电子泵站。**
3. P-680 释放出的 **高能电子**，通过一电子传递链（**光合链**）将电子传递到 P-700，电子传递过程中释放出的能量用于 **合成 ATP**。
4. P-680 在释放电子后留下的 **电子空穴**，由水分子光解释放的低能电子所填补。



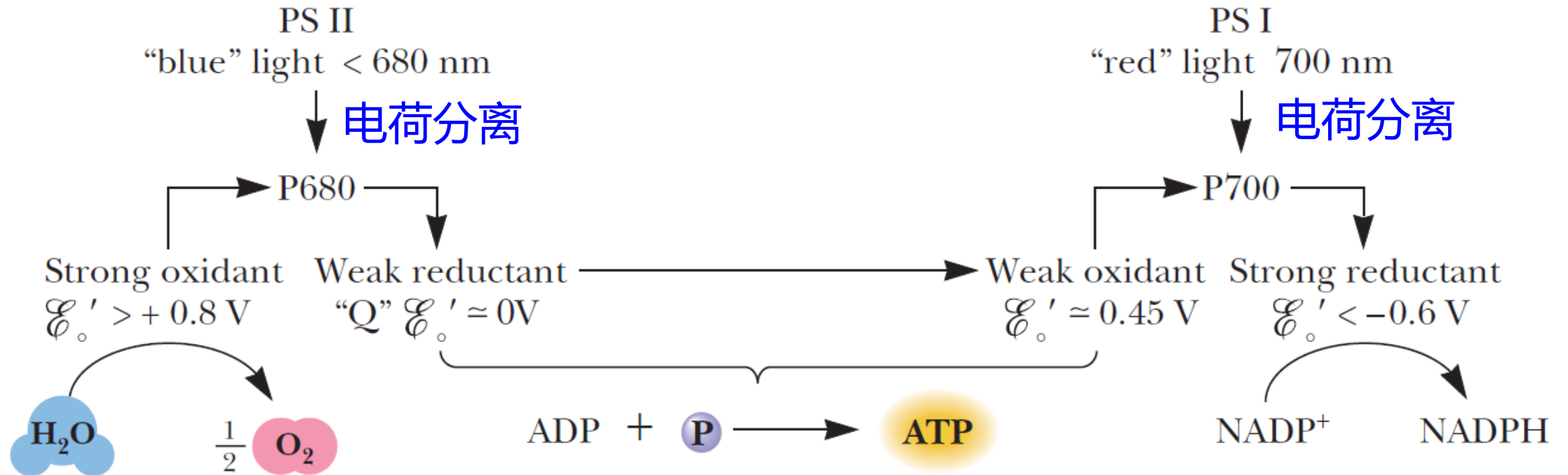
**Pheo (Ph):** 脱镁叶绿素

**$Q_A$ ,  $Q_B$ :** 质体醌

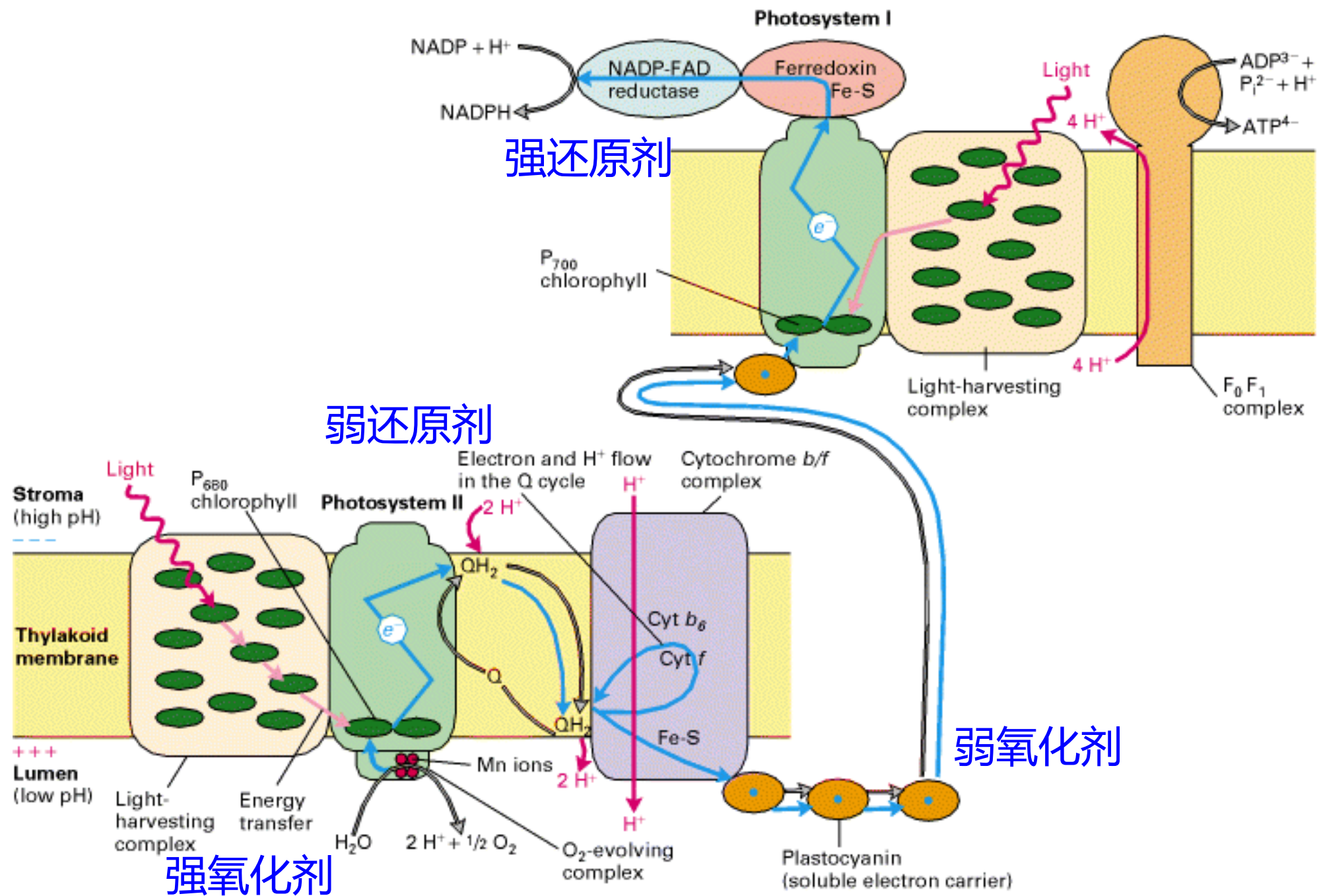
**Z:** PS II膜蛋白中的Tyr残基



# Roles of PS I and PS II

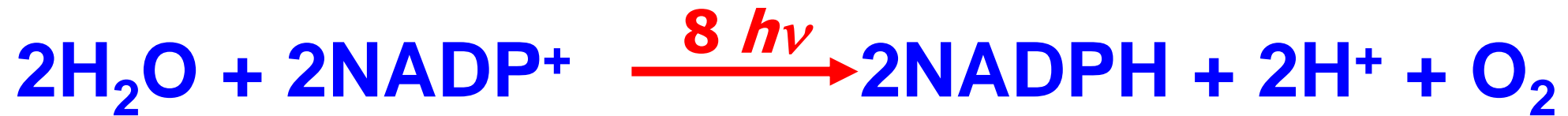


- **PSI:** provides reducing power in the form of NADPH.
- **PSII:** splits water, producing  $\text{O}_2$ , and feeds the electrons released into an electron transport chain that couples PSII to PSI.
- Electron transfer between PSII and PSI pumps protons for chemiosmotic ATP synthesis.



# 光反应机制小结

- ① 光反应主要由PS I 和PS II 共同完成。 PS I 和PS II 通过一个电子传递链（光合链）连成一个整体，相互补充、协调。
- ② 光反应实际是电子由 $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NADP}^+$ 的传递过程，总反应为：



动画

# 光反应机制小结

③ 当电子从PS II传到PS I过程中，释放的能量与ATP合成相偶联，称作光合磷酸化。它包括**非环式光合磷酸化**和**环式光合磷酸化**。

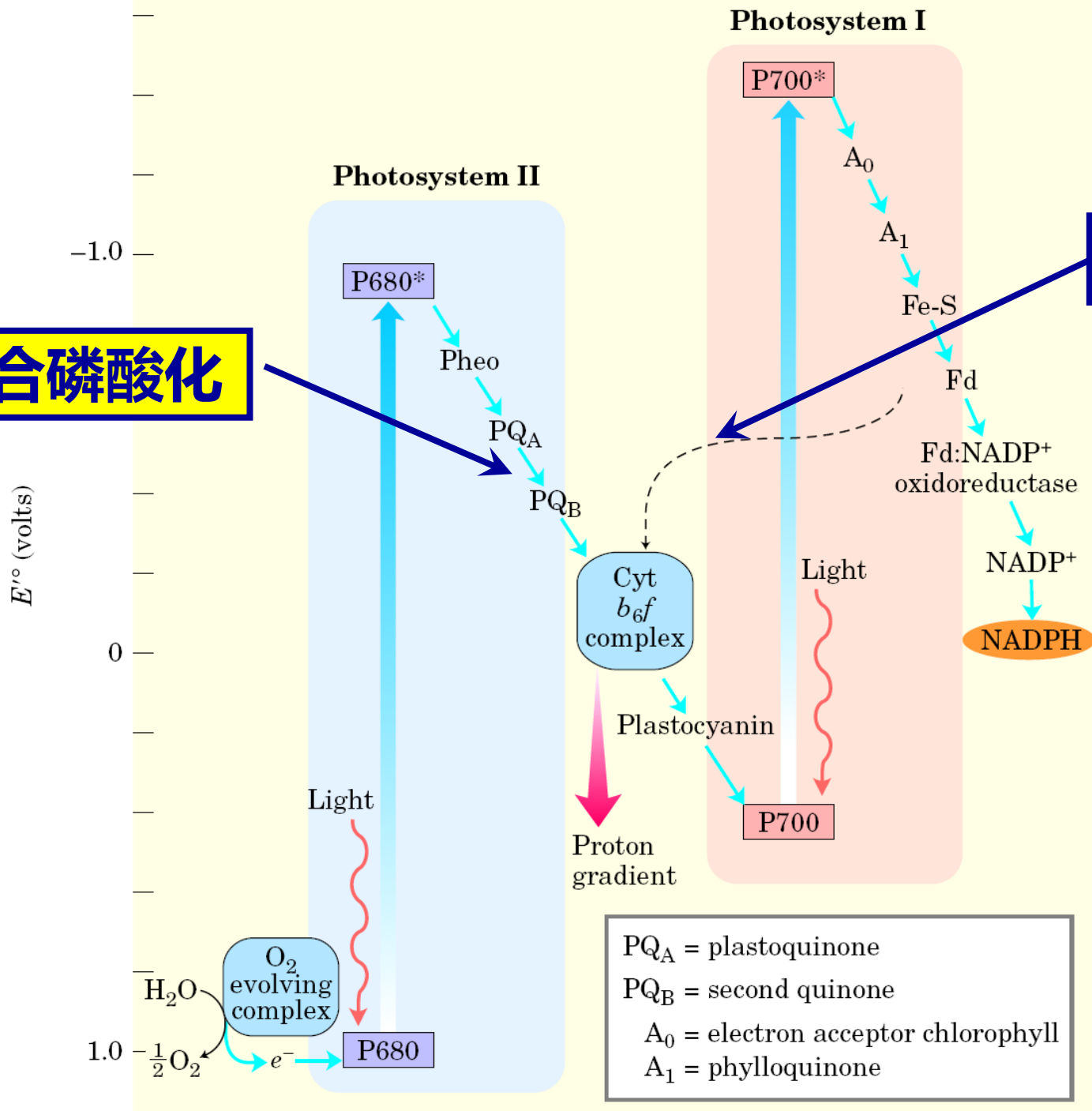
④ 光反应电子传递： $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NADP}^+$ ;

呼吸链电子传递： $\text{NADH} \rightarrow \text{O}_2$

$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NADP}^+$ ，电子是**逆电位流动**的，推动这种电子逆流的能量就是两个光反应系统吸收的光能。

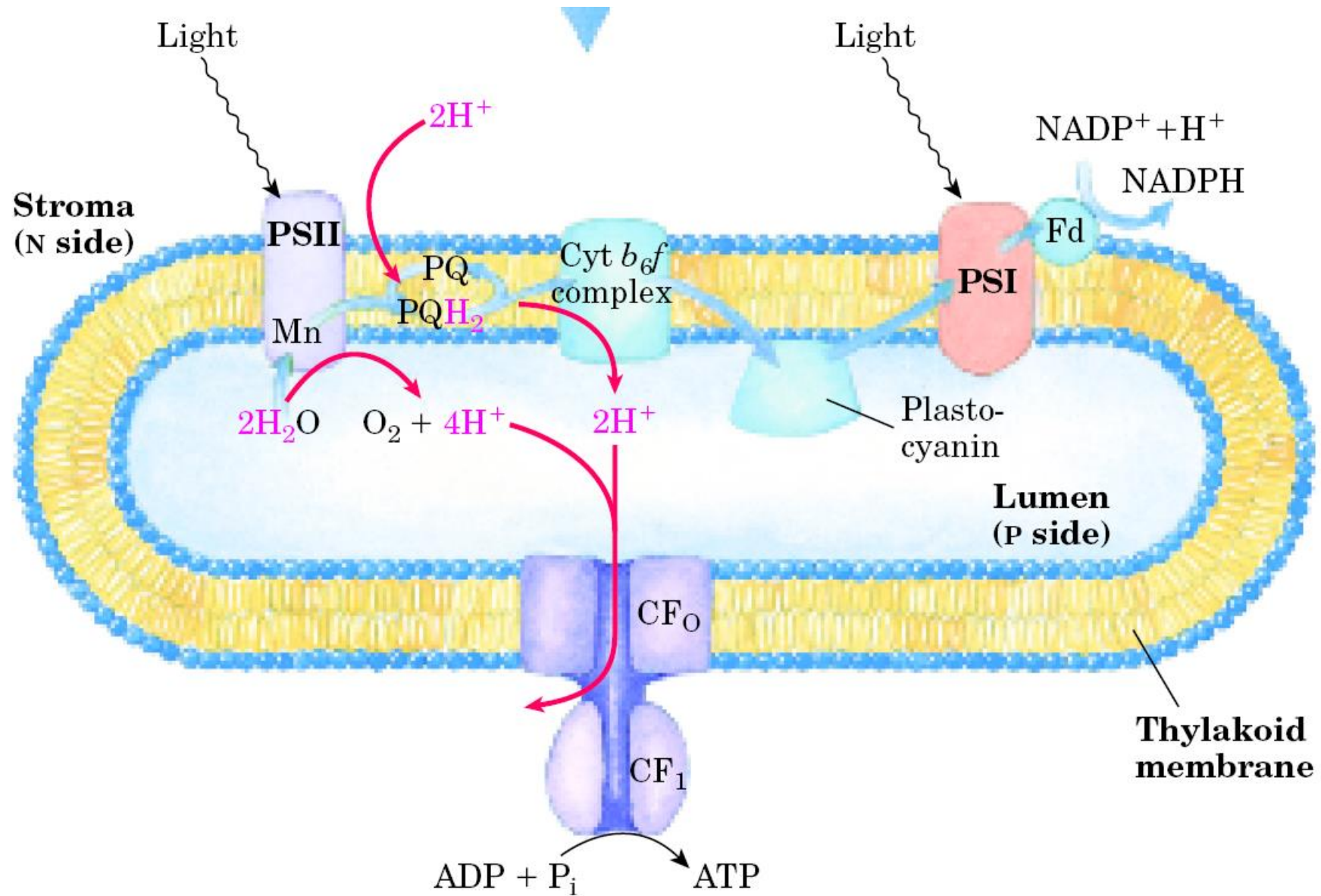


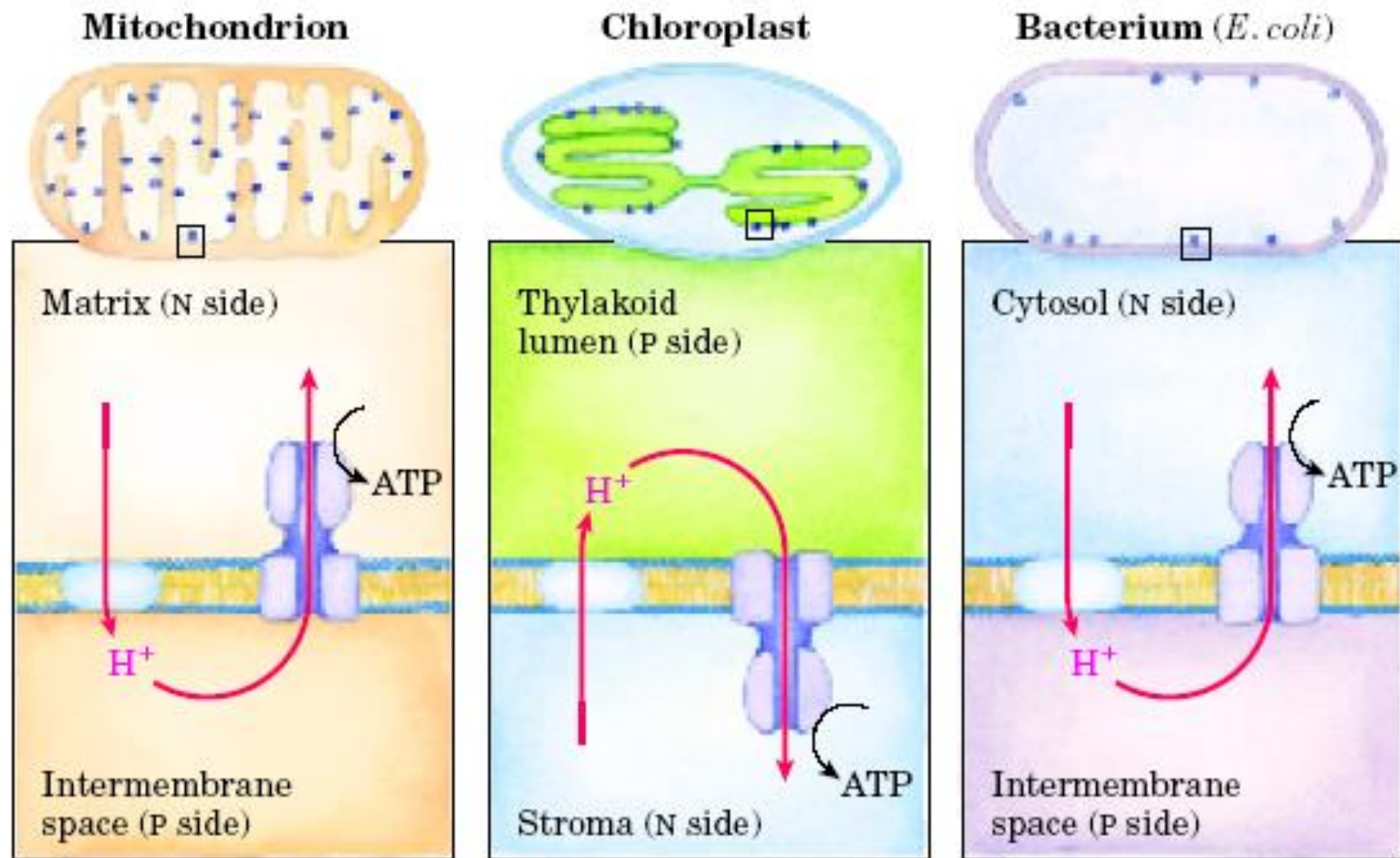
## 非环式光合磷酸化



## 环式光合磷酸化

# Proton and electron circuits in thylakoids





**FIGURE 19-58** Comparison of the topology of proton movement and ATP synthase orientation in the membranes of mitochondria, chloroplasts, and the bacterium *E. coli*. In each case, orientation of the proton gradient relative to ATP synthase activity is the same.

# 三、光合作用

## 5. 暗反应机制

---

- 酶催化反应过程，不需光参加，故称暗反应。
- 由光反应产生的NADPH在ATP供给能量，将CO<sub>2</sub>还原成糖的反应过程。
- 根据暗反应第一个产物的不同，分为：
  - C<sub>3</sub>途径：**大多数植物  
第一个产物：3-磷酸甘油酸（PGA）
  - C<sub>4</sub>途径：**甘蔗和玉米等高产作物  
第一个产物：草酰乙酸

# 5. 暗反应机制

---

## 5.1 C<sub>3</sub>途径

- **C<sub>3</sub>途径**：以循环形式进行，又称**三碳循环**。
- **Calvin循环**： M. Calvin首先提出（1961年获诺贝尔化学奖）。
- **三碳植物**：以三碳循环进行合成代谢的植物
- C<sub>3</sub>途径中，CO<sub>2</sub>的受体是1, 5-二磷酸核酮糖（ribulose 1, 5-biphosphate, **RuBP**）

# C<sub>3</sub>途径的三个阶段

---

## Stage 1:

Fixation of CO<sub>2</sub> into 3-Phosphoglycerate

## Stage 2:

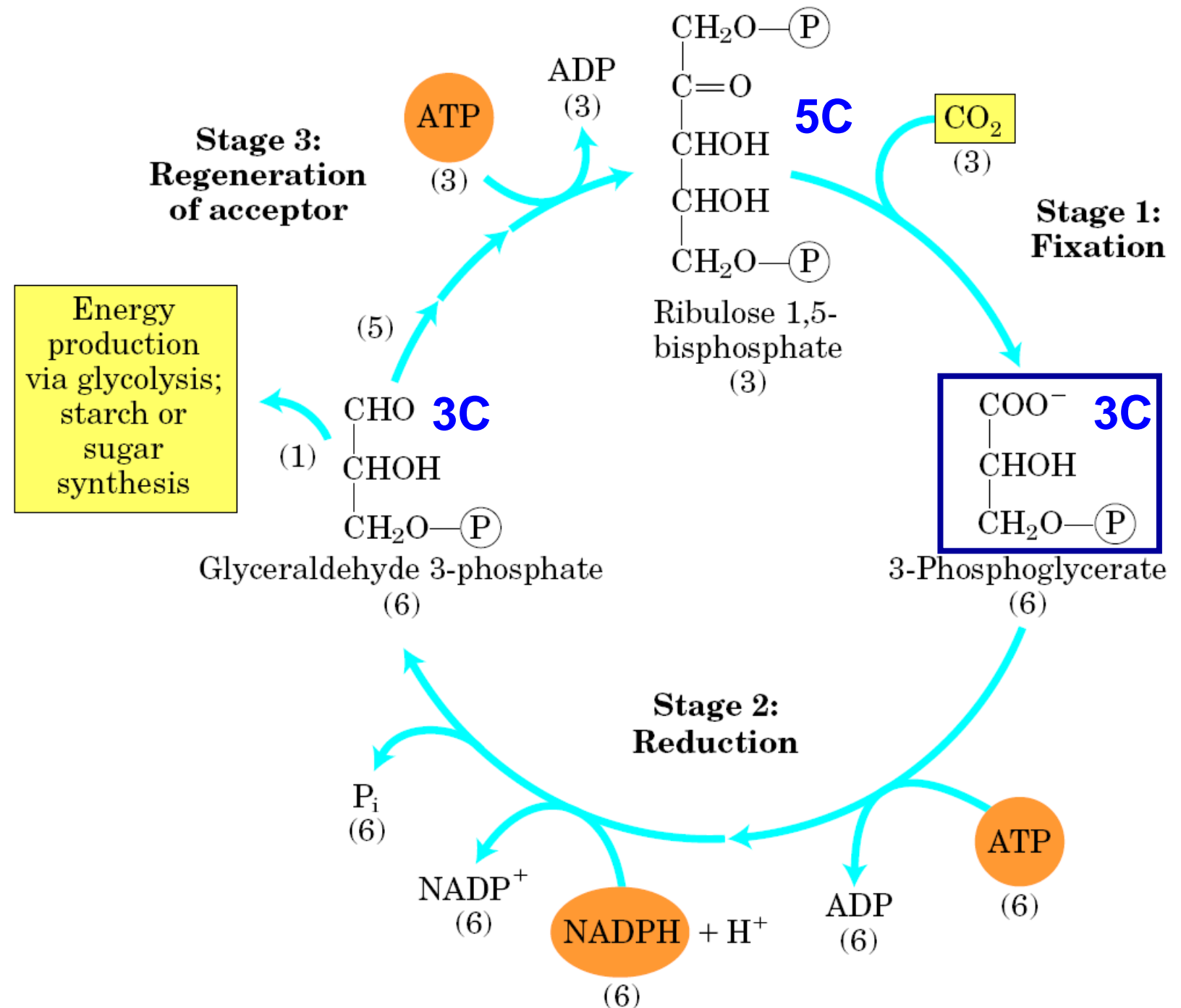
Conversion of 3-Phosphoglycerate to Glyceraldehyde  
3-Phosphate

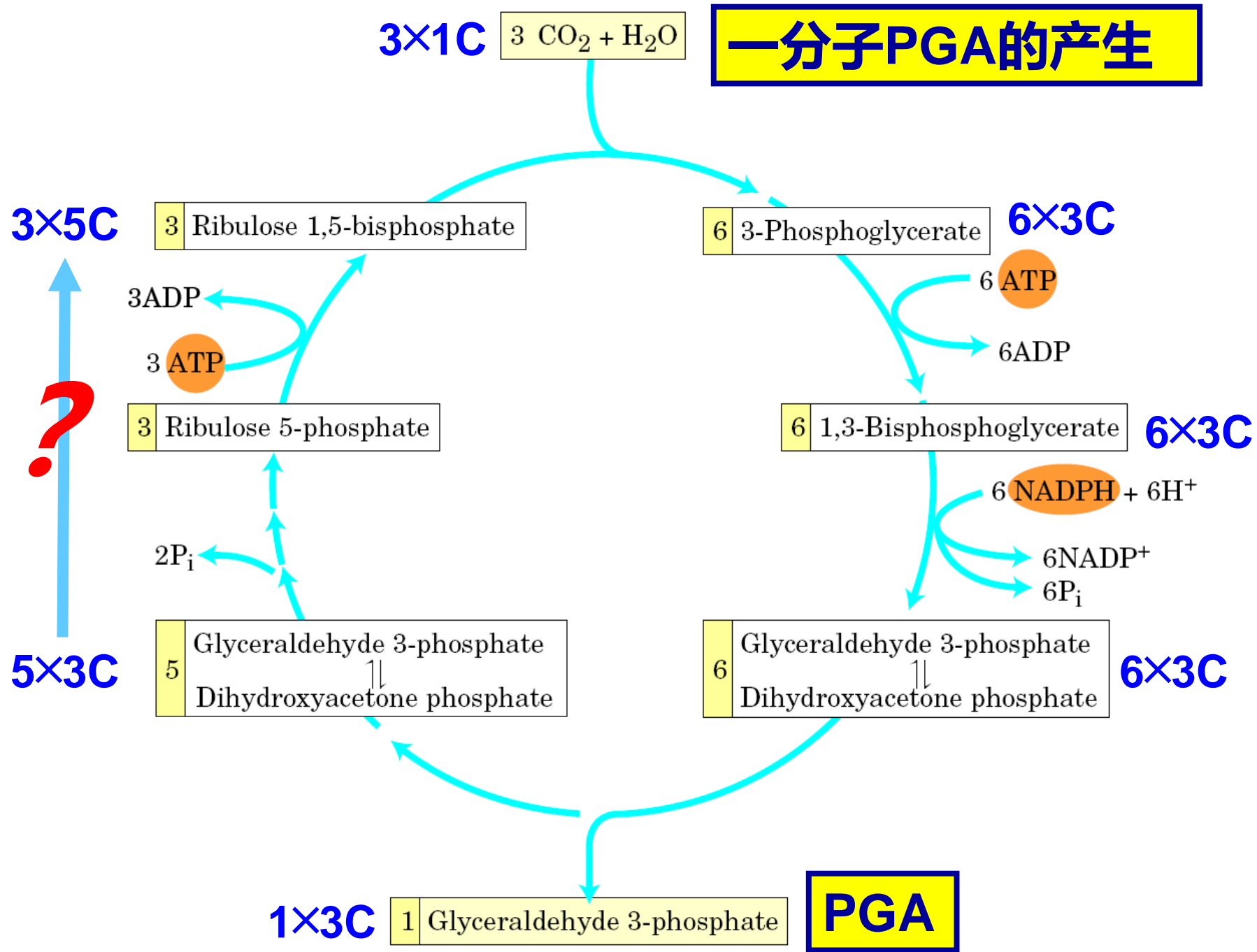
## Stage 3:

Regeneration of Ribulose 1,5-Bisphosphate from  
Triose Phosphates



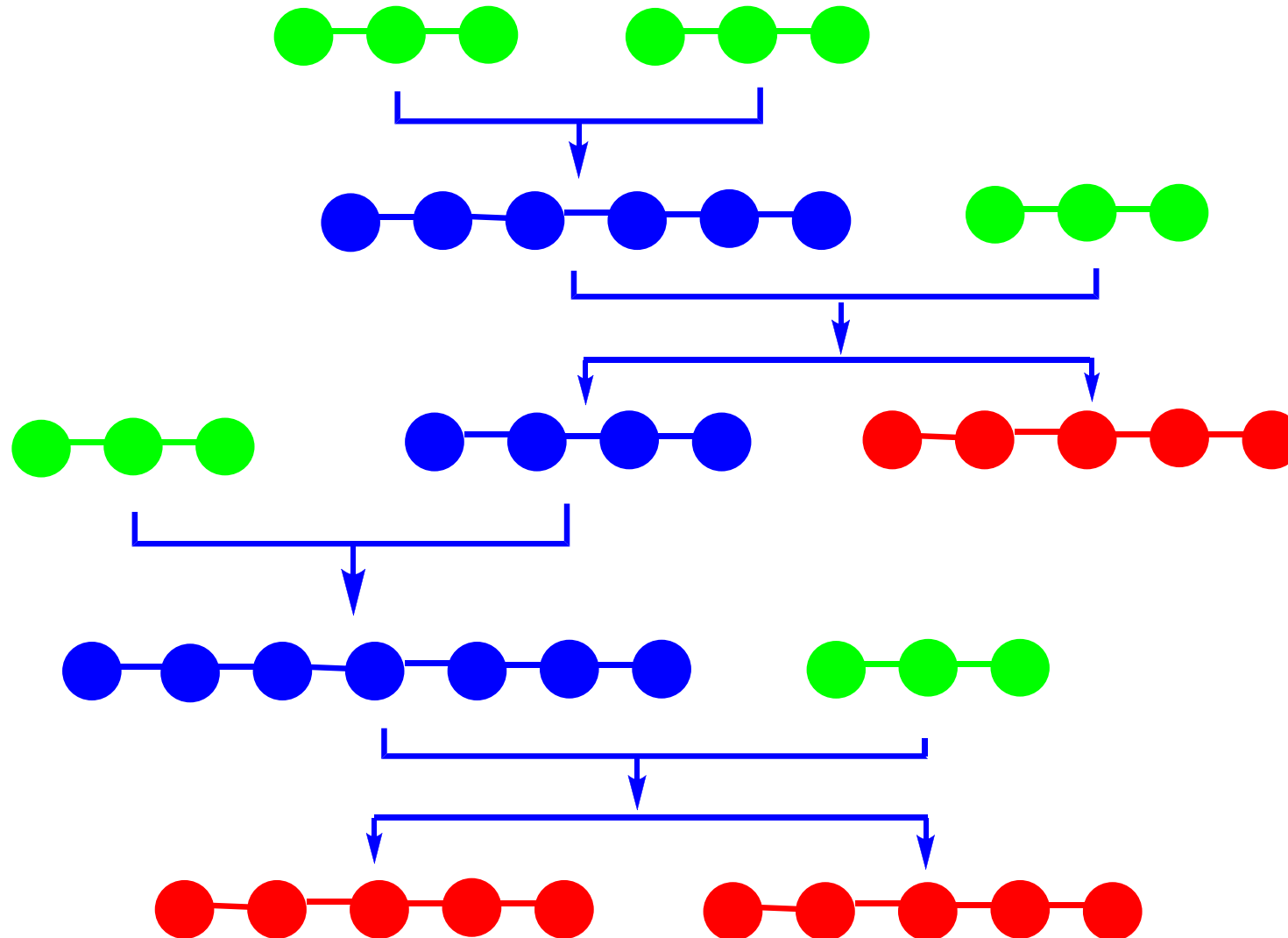
# Calvin cycle



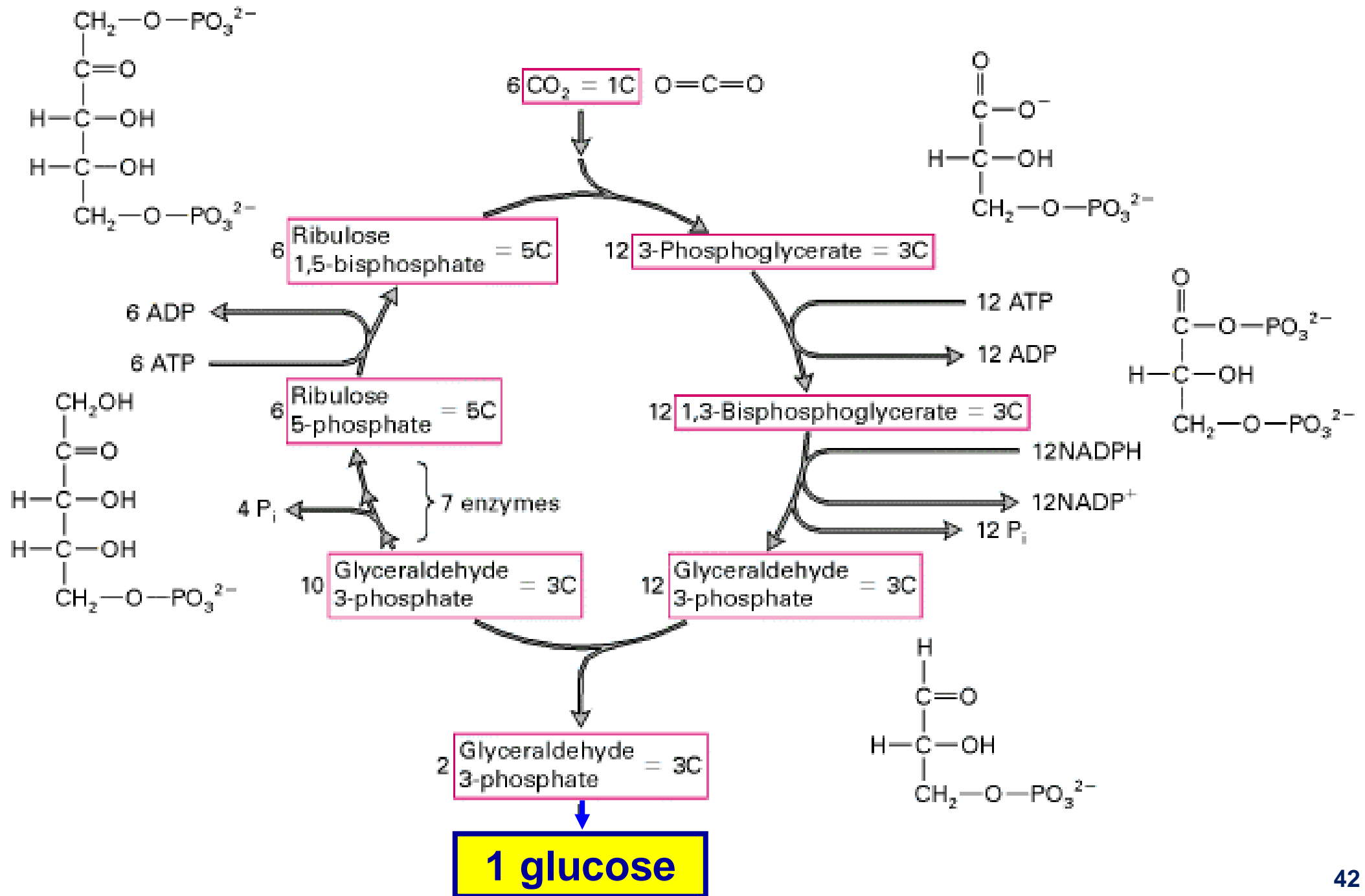




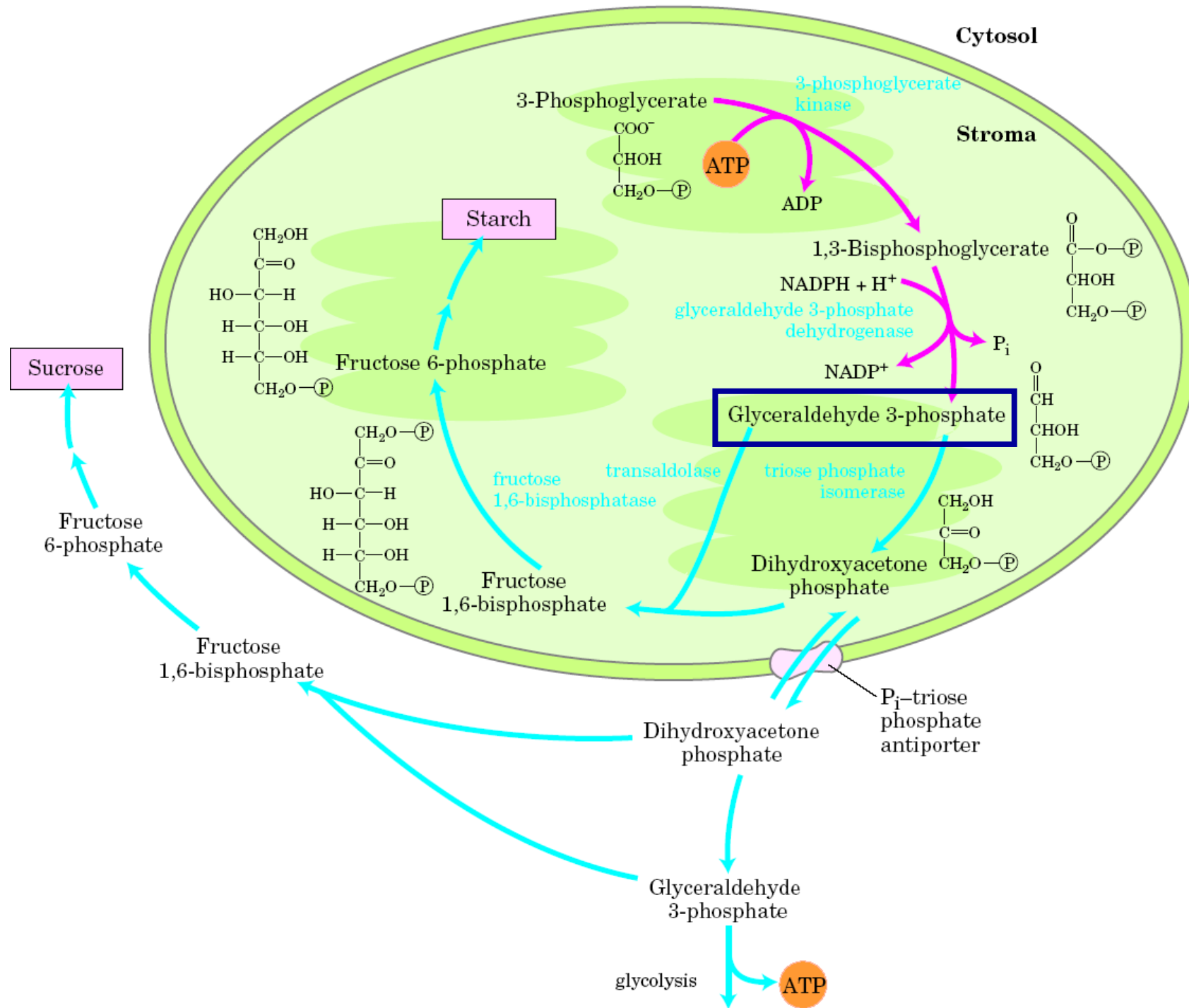
5 PGA (green)  $\longrightarrow$  3 RuBP (red)?



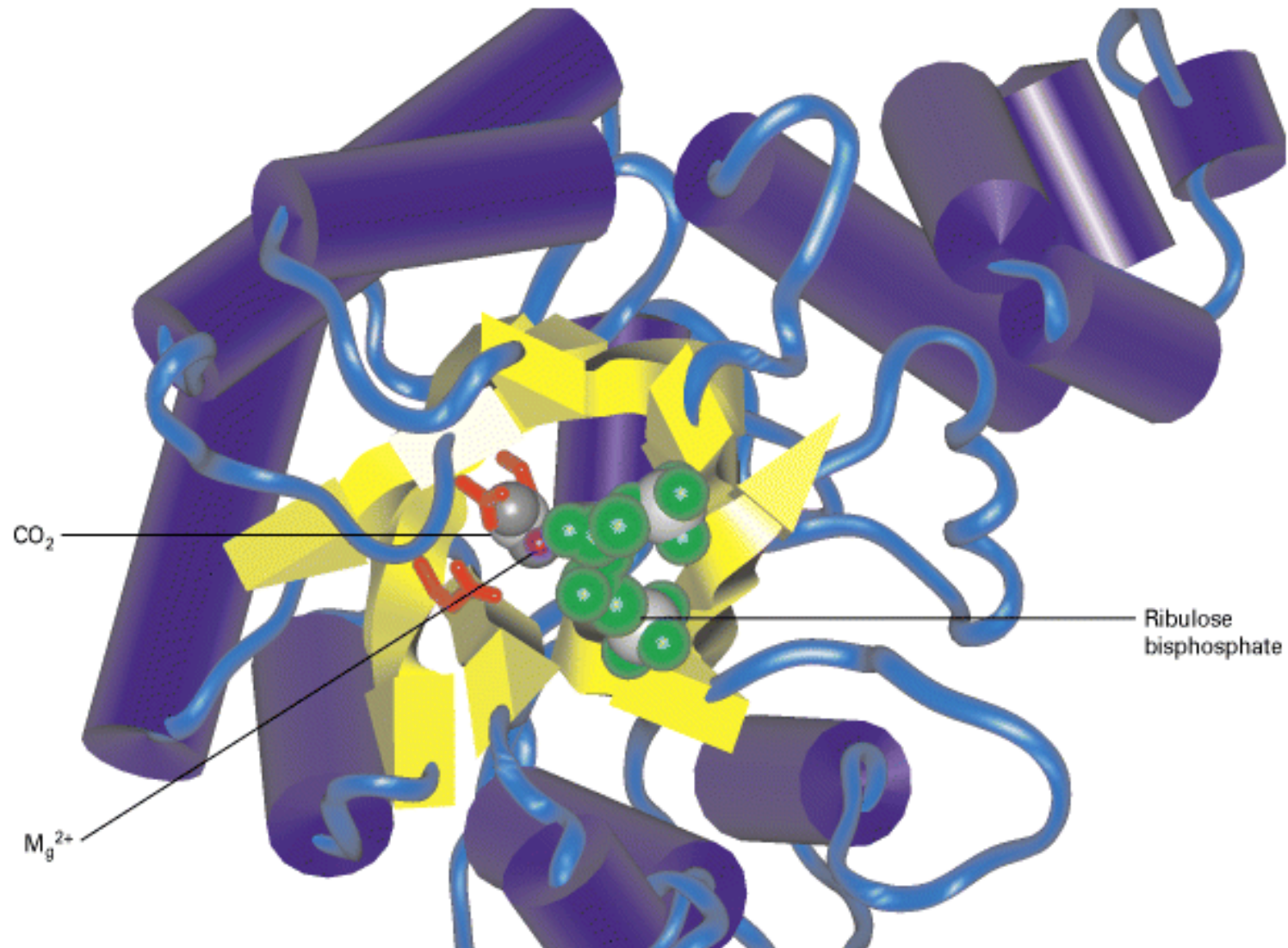
# 一分子葡萄糖的产生



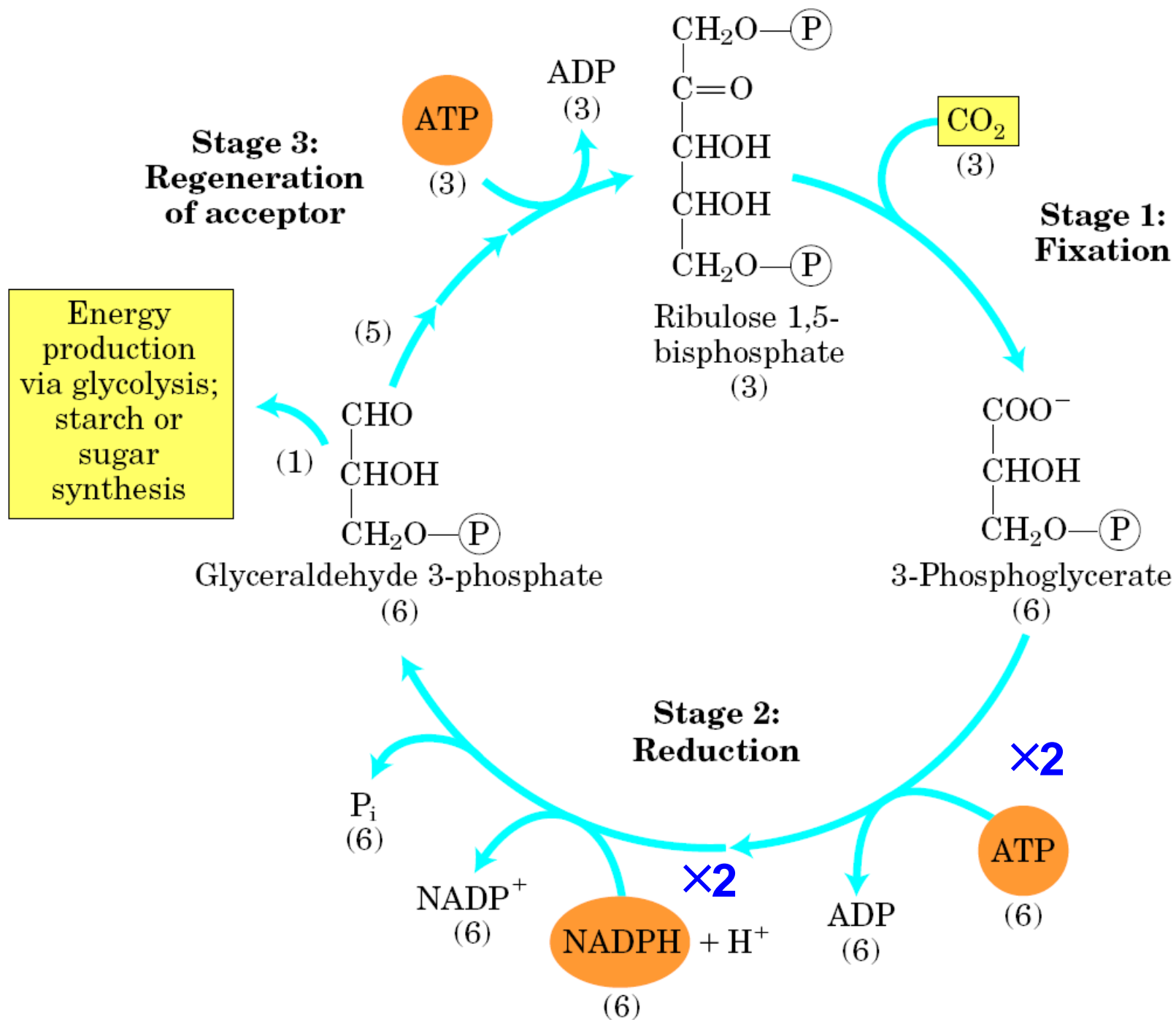
# 淀粉和蔗糖的产生



# 1, 5-二磷酸核酮糖羧化酶的活性部位



# C<sub>3</sub>途径的能量消耗



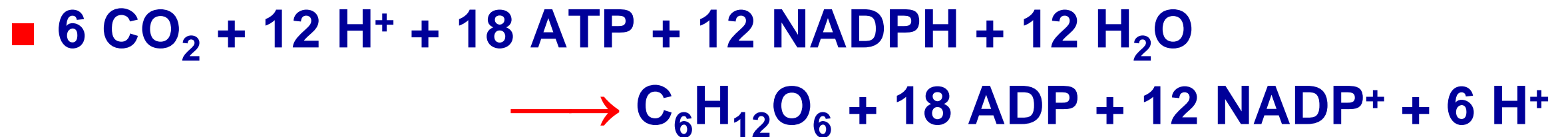
# C<sub>3</sub>途径的能量消耗

- 每一循环,  $1 \text{ RuBP} + 1 \text{ CO}_2 \rightarrow 6\text{-磷酸果糖}$ 。

其中: 5/6分子6-磷酸果糖参与再循环

1/6分子6-磷酸果糖变成葡萄糖

因此: 生成一分子葡萄糖共需6个循环, 总反应式:



$$\Delta G^{\circ'} = 476.8 \text{ kJ / mol}$$

- 三碳循环中, 每还原1分子CO<sub>2</sub>需消耗3分子ATP和2分子NADPH。

## 5. 暗反应机制

---

### 5.2 C<sub>4</sub>途径

- 大部分热带植物，如玉米，甘蔗，高粱等，采用C<sub>4</sub>途径固定和还原CO<sub>2</sub>。
- C<sub>4</sub>途径包括两个循环：

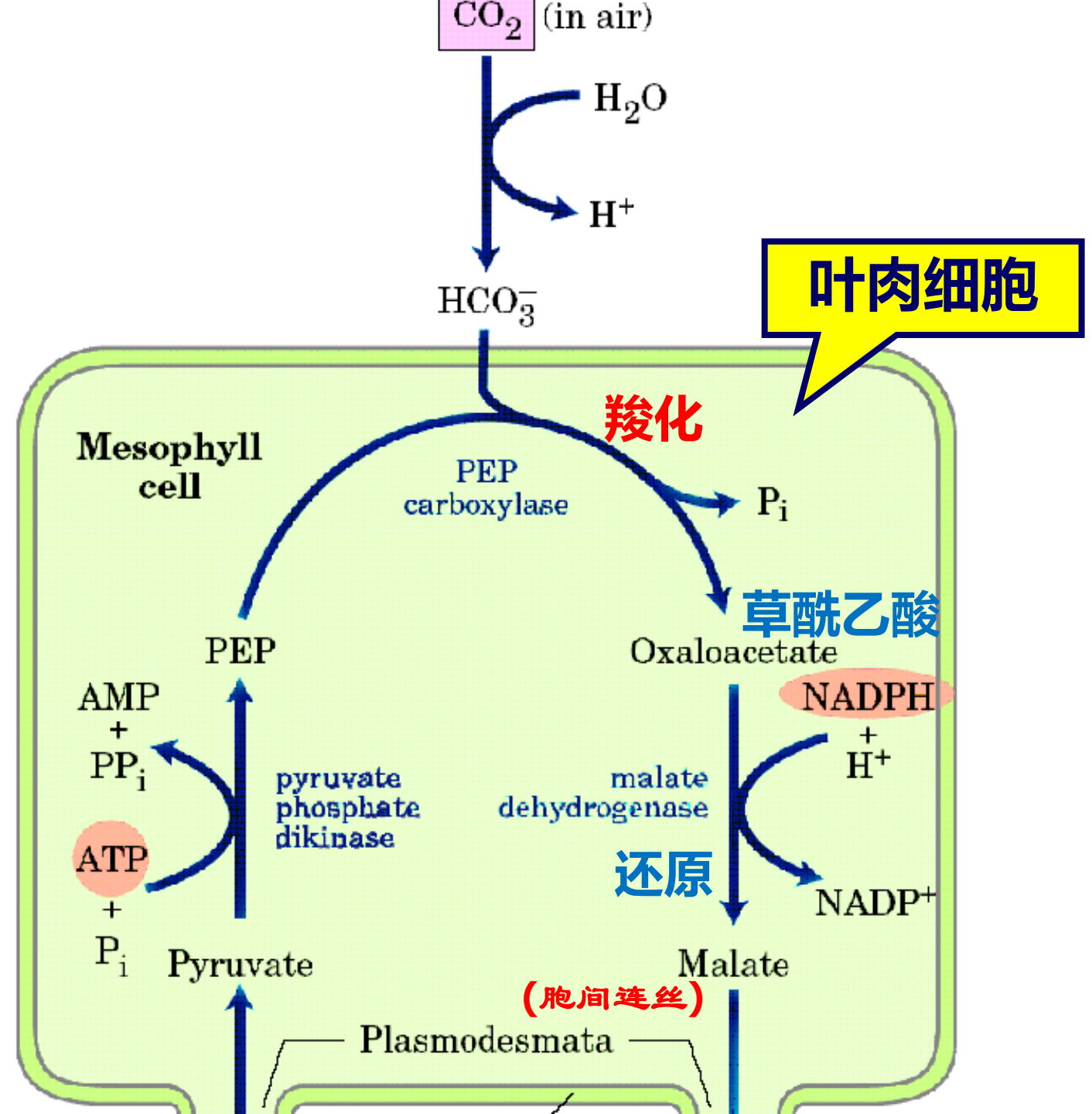
C<sub>4</sub> cycle: CO<sub>2</sub>的固定和运输

C<sub>3</sub> cycle: CO<sub>2</sub>的再固定和还原



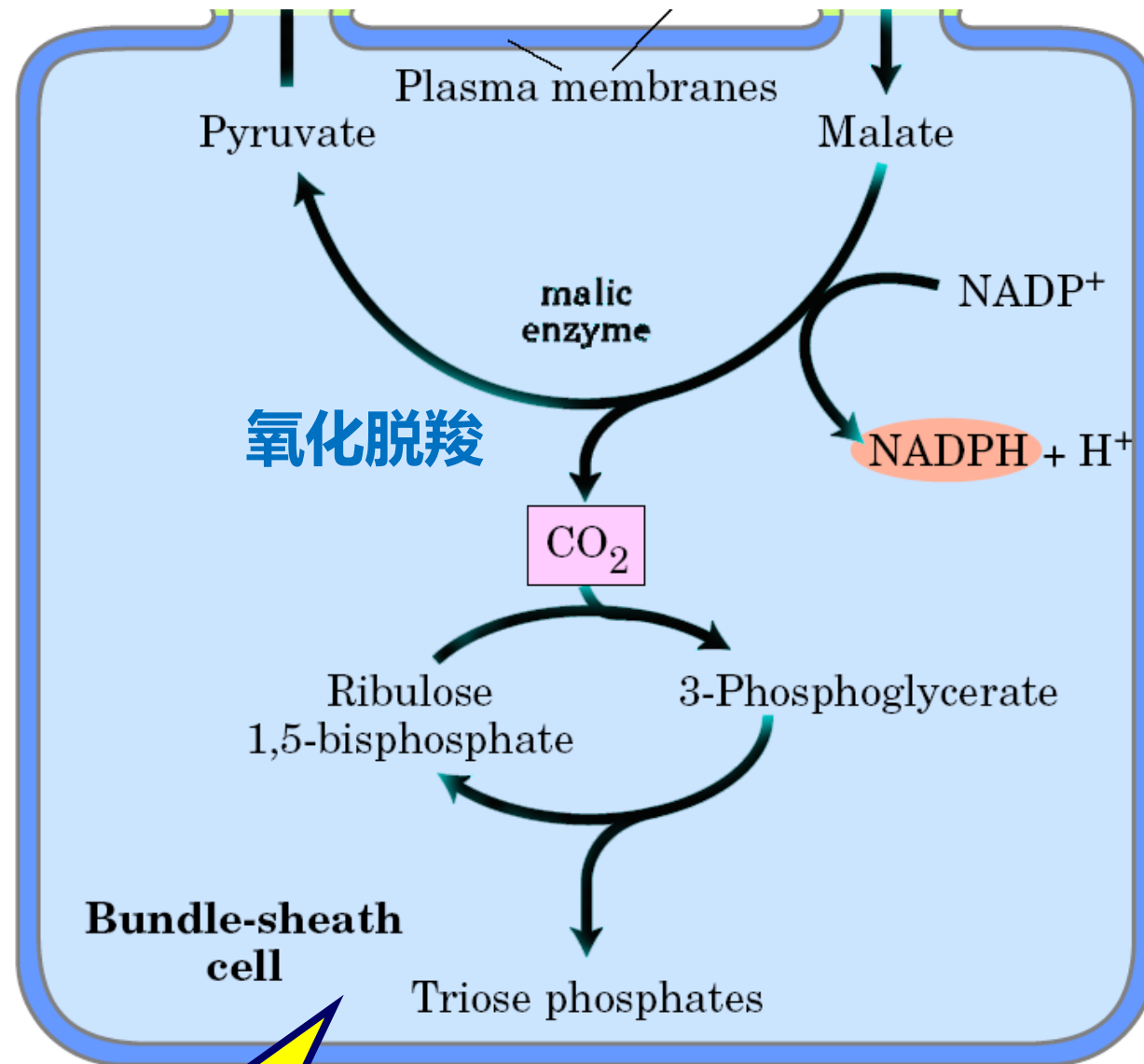
# C<sub>4</sub> cycle

## CO<sub>2</sub>的固定和运输



## $C_3$ cycle

## $CO_2$ 的再固定和还原



微管束鞘细胞

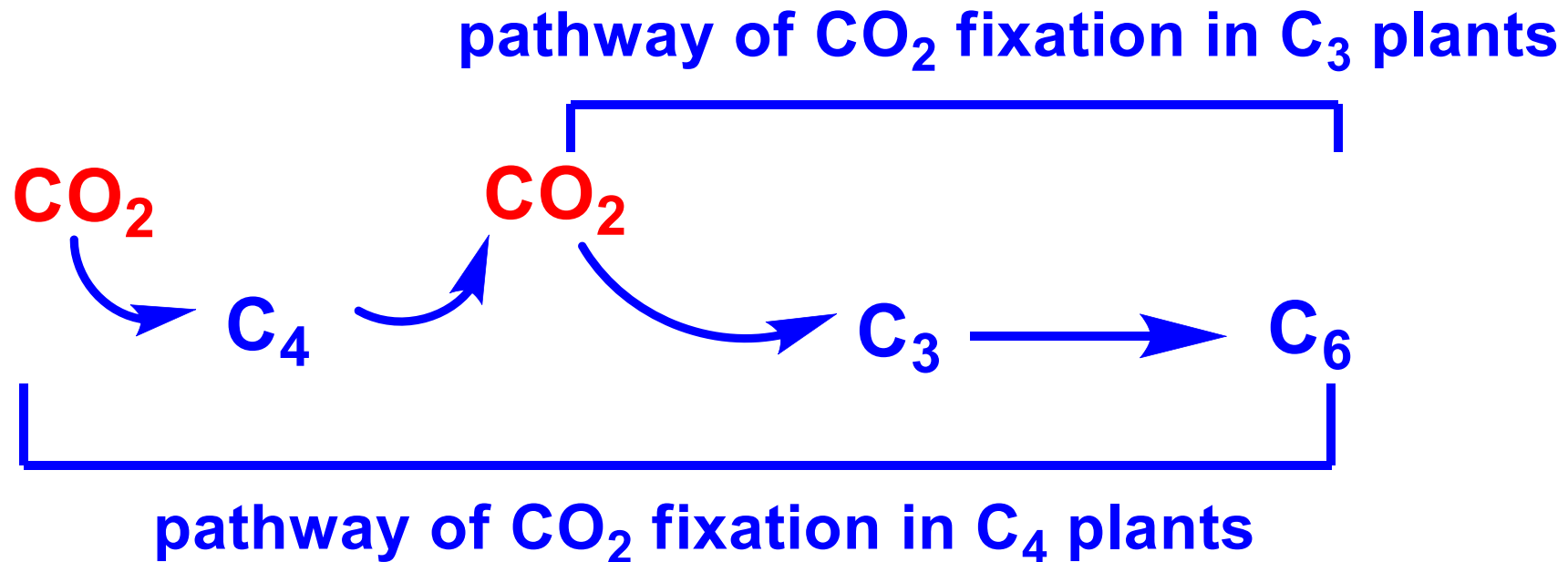
# C<sub>4</sub> cycle and C<sub>3</sub> cycle

---

- C<sub>4</sub> cycle不还原CO<sub>2</sub>，只对CO<sub>2</sub>起固定和转运给C<sub>3</sub> cycle的作用。
- C<sub>4</sub> cycle把外界大气中的CO<sub>2</sub>转移到叶内，使叶内的CO<sub>2</sub>浓度增加。
- 虽然C<sub>4</sub> 途径要多消耗ATP（2ATP），但却保证了叶内高浓度CO<sub>2</sub>的供应，使还原CO<sub>2</sub>成糖的速度加快，因此C<sub>4</sub>植物的光合作用效率要比C<sub>3</sub>植物的高。

# C<sub>4</sub> cycle and C<sub>3</sub> cycle

---



## Cell-free chemoenzymatic starch synthesis from carbon dioxide

光合作用

&gt;60 步

2%转化率

&gt;100 天

5亩玉米地  
年产

人工合成

11步

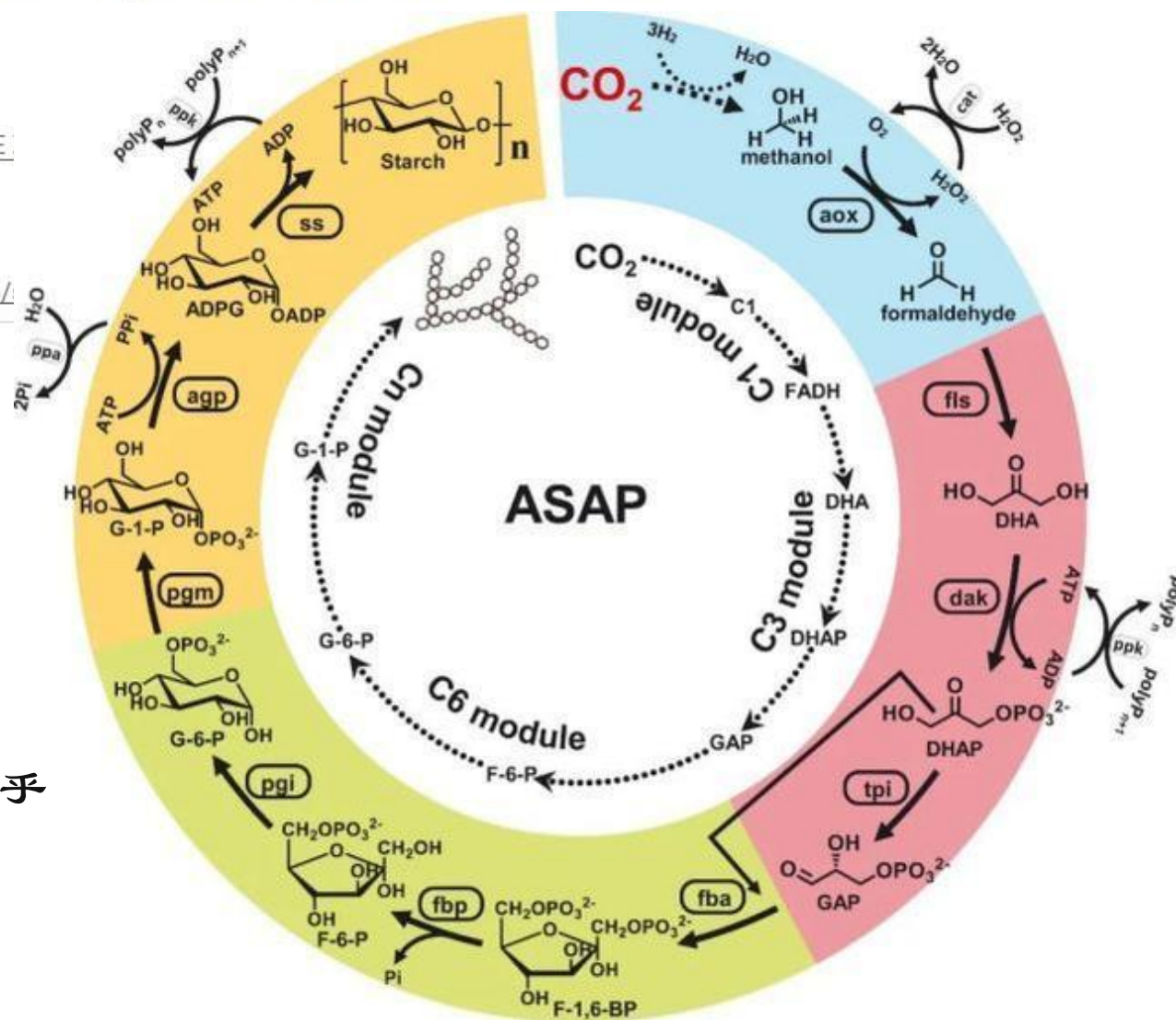
7%转化率

4小时

1立方米  
反应器

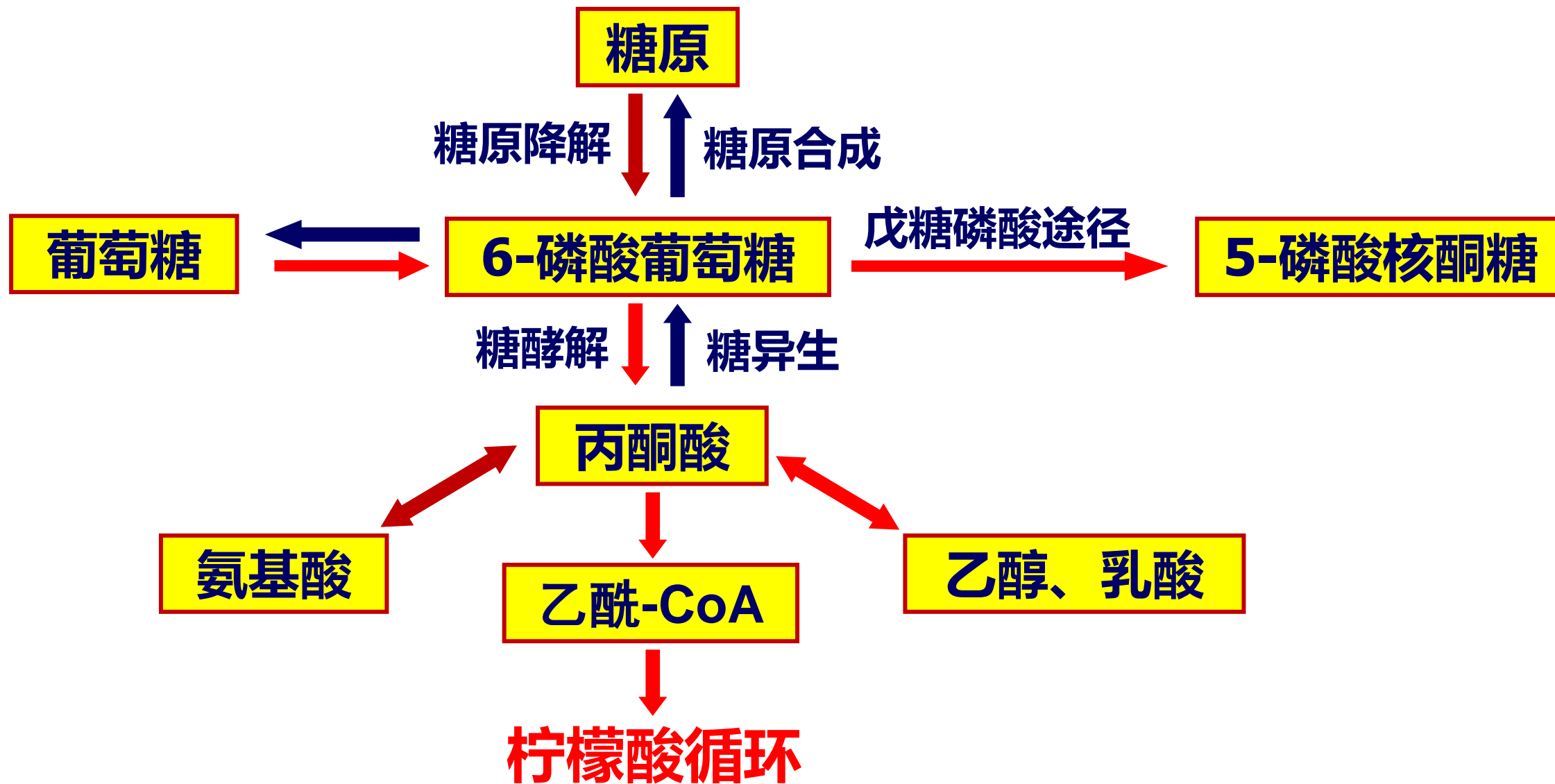
我国科学家突破二氧化碳人工合成淀粉技术，  
这一突破对当下及未来会产生哪些影响？ - 知乎  
<https://www.zhihu.com/question/488626676>

依然任重而道远！

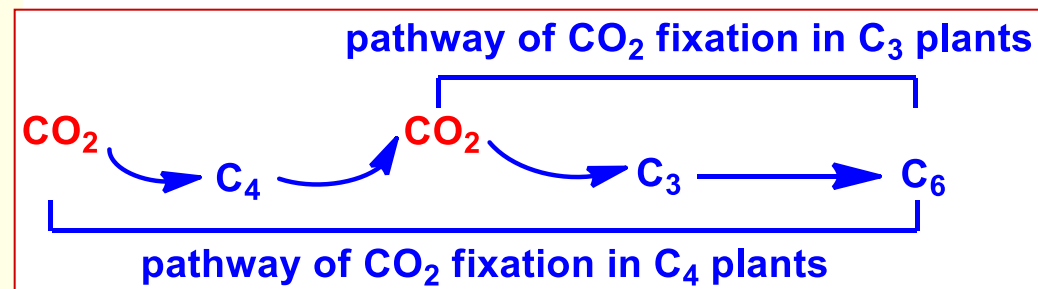
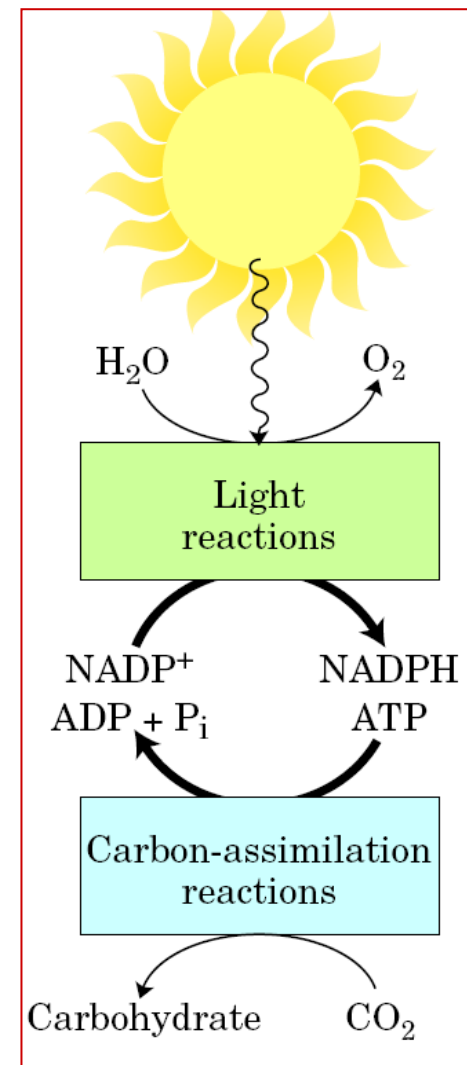
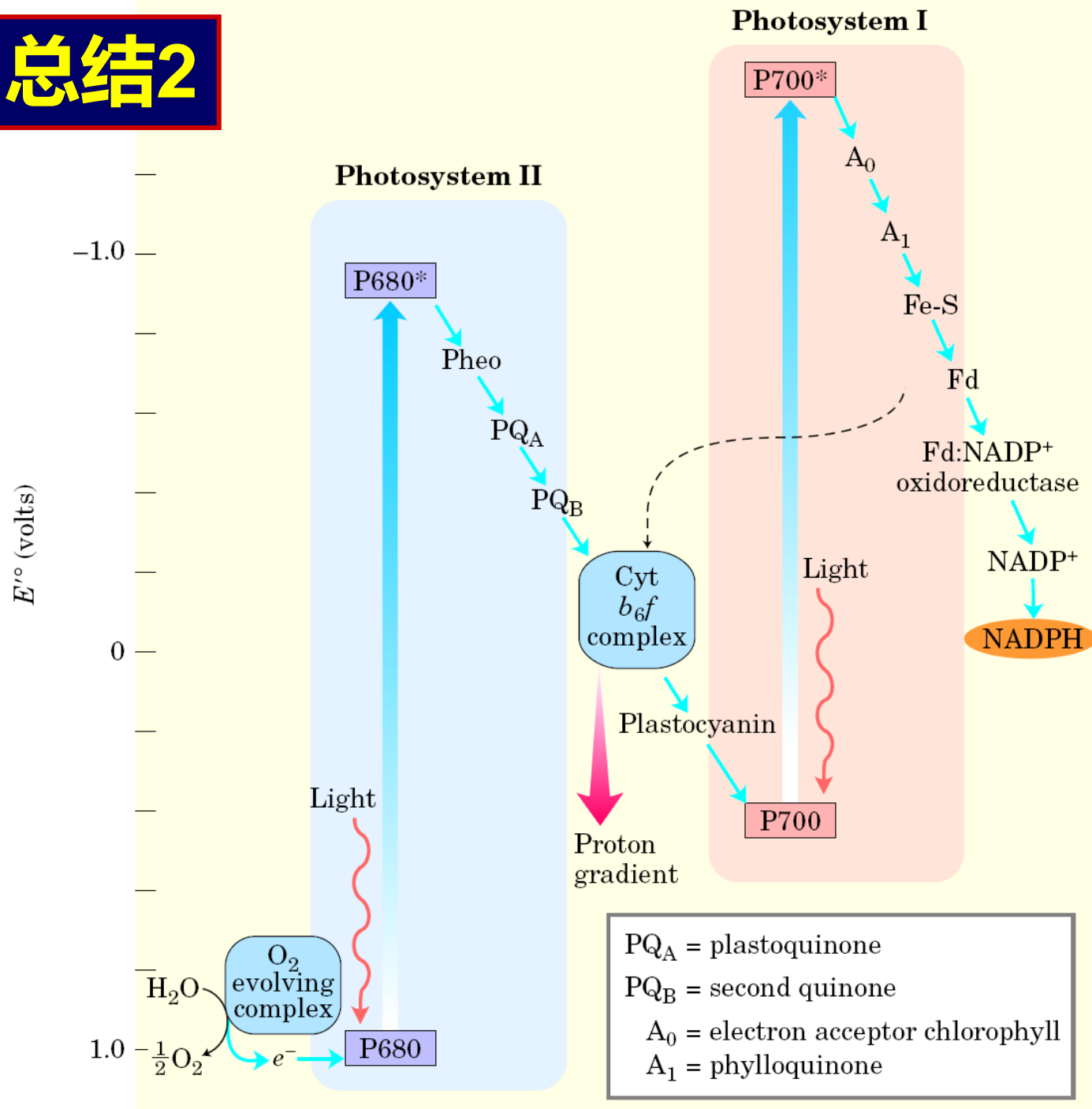


## 总结1

# 葡萄糖的代谢去向



# 总结2





# 预 习

---

四. 脂类代谢（重点） -- 翻转课堂

五. 蛋白质降解和氨基酸代谢（重点）

探究题展示（5）

下周一（12.11）8:00-8:15