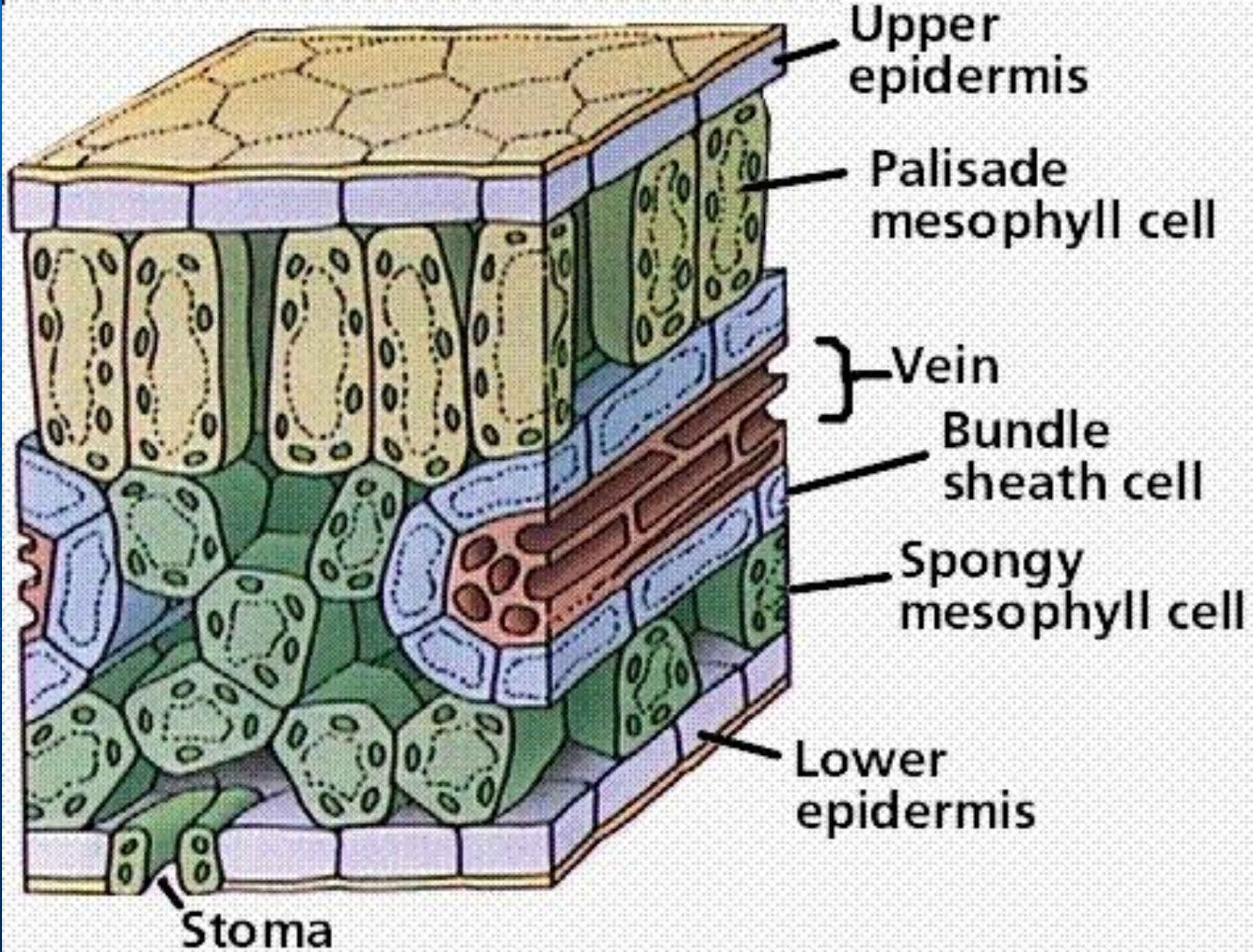
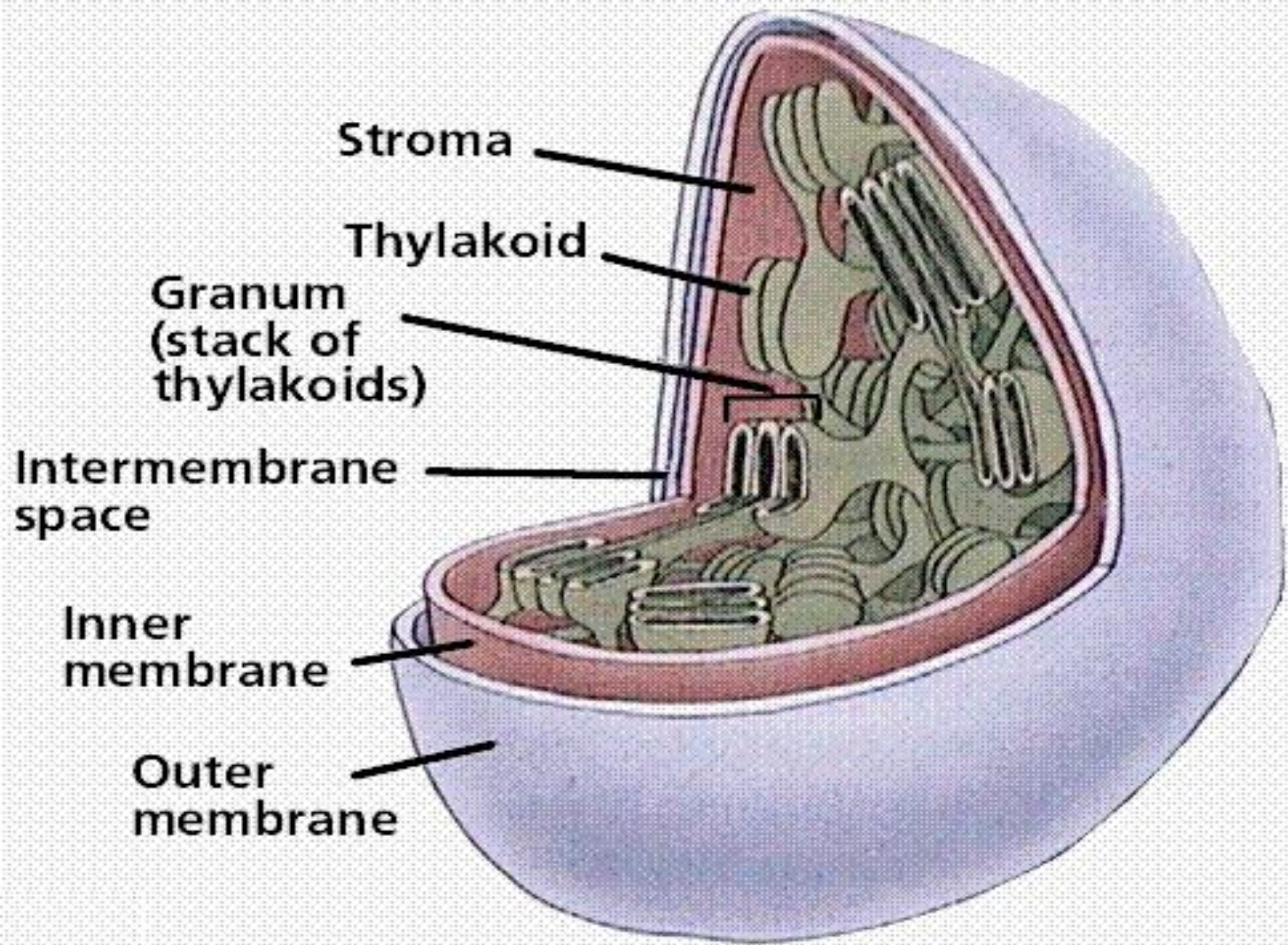


Лекция 4. Тақырып: Фотосинтездің жарық сатысы

- 1. Фотосинтездік жүйелердегі энергия ауысу процестері
- 2. Электрондардық циклсіз (айналымсыз) тасымалдануы және НАДФН пен АТФ-тың синтезделуі
- 3. Электрондардың P700-ден НАДФ⁺-қа дейін тасымалдану тізбегі.
- 4. Оттегінің бөліну жүйесі.
- 5. Электрондардың циклді тасымалдануы
- 6. Фотосинтездік фосфорлану

- **1. Фотосинтездік жүйелердегі энергия ауысу процестері**
- **Фотосинтездің жарық сатысы** фотосинтездік жүйелер құрамындары пигменттердің жарық квантын (фотон) сіңіруінен басталады.
- Жеке пигменттердің сіңіретін сәулелері спектрдің әр түрлі аймақтарына тура келеді.
- Бул ерекшеліктер олардың молекулаларындағы **электрондардың орналасу** реттеріне байланысты.



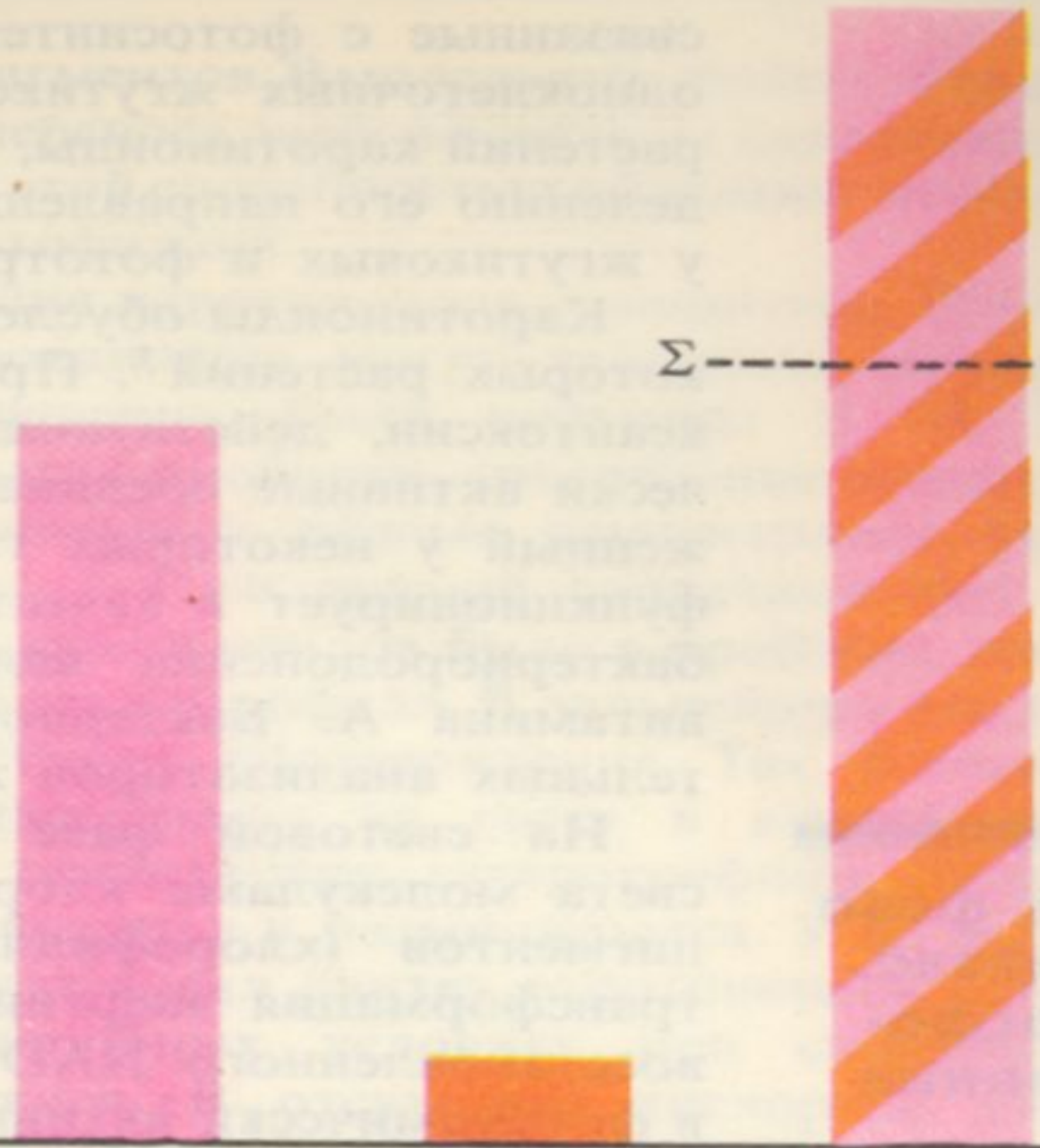


- **Эмерсон эффектiсi.**
- 680—700 нм ұзындығы бар толқындардың тиiмдiлiгiн ұлғайту үшiн ұзындығы қысқа (650—660 нм) толқындарды қосу керектiн **Р. Эмерсон** көрсеттi.
- Фотосинтездiң тиiмдiлiгi аралас сәулемен сәулеленгенде (екi ұзындығы бар сәуле) әр бiреуiмен бөлек сәулеленген фотосинтездiң тиiмдiлiгiнен жоғары болды.
- Бұл құбылысты **ұлғайтатын Эмерсон эффектiсi** деп атайды.

0,12
0,08
0,04
0

650 700 650 + 700

Σ -----



- 1 және 1. 2 фотожүйелер. Циклдік және циклсіз электрон тасмалдау жолдары.

- *Фотосинтездің фотохимиялық реакциялары* – күн сәулесінің энергиясы химиялық байланыстардың энергиясына айналу реакциялары, біріншіден фосфорлық байланыстардың энергиясына айналу.
- **АТФ – энергетикалық валюта болып саналады**, ол барлық процестердің жүруін қамтамасыз етеді.
- Күн сәуле әсерінен су ыдырайды да, тотықсызданған НАДФ түзіледі, оттегі бөлінеді.

- Сіңірілген сәуле кванттардың энергиясы бірнеше жүз пигменттерден фотохимиялық реакциялық орталыққа жиналады
- Онда белгілі **хлорофилл *a*** молекуласының жұпы (**димер**) орналасады.
- Олар ұзын толқындарды сіңіруге қабілетті.

**Сіңірілген сәуле кванттар
энергиясы**



**Сәуле жинайтын кешен
/бірнеше жүз пигменттер/**



**Фотохимиялық реакциялық
орталығы
хлорофилл а молекуласының
жұпы /димер/**

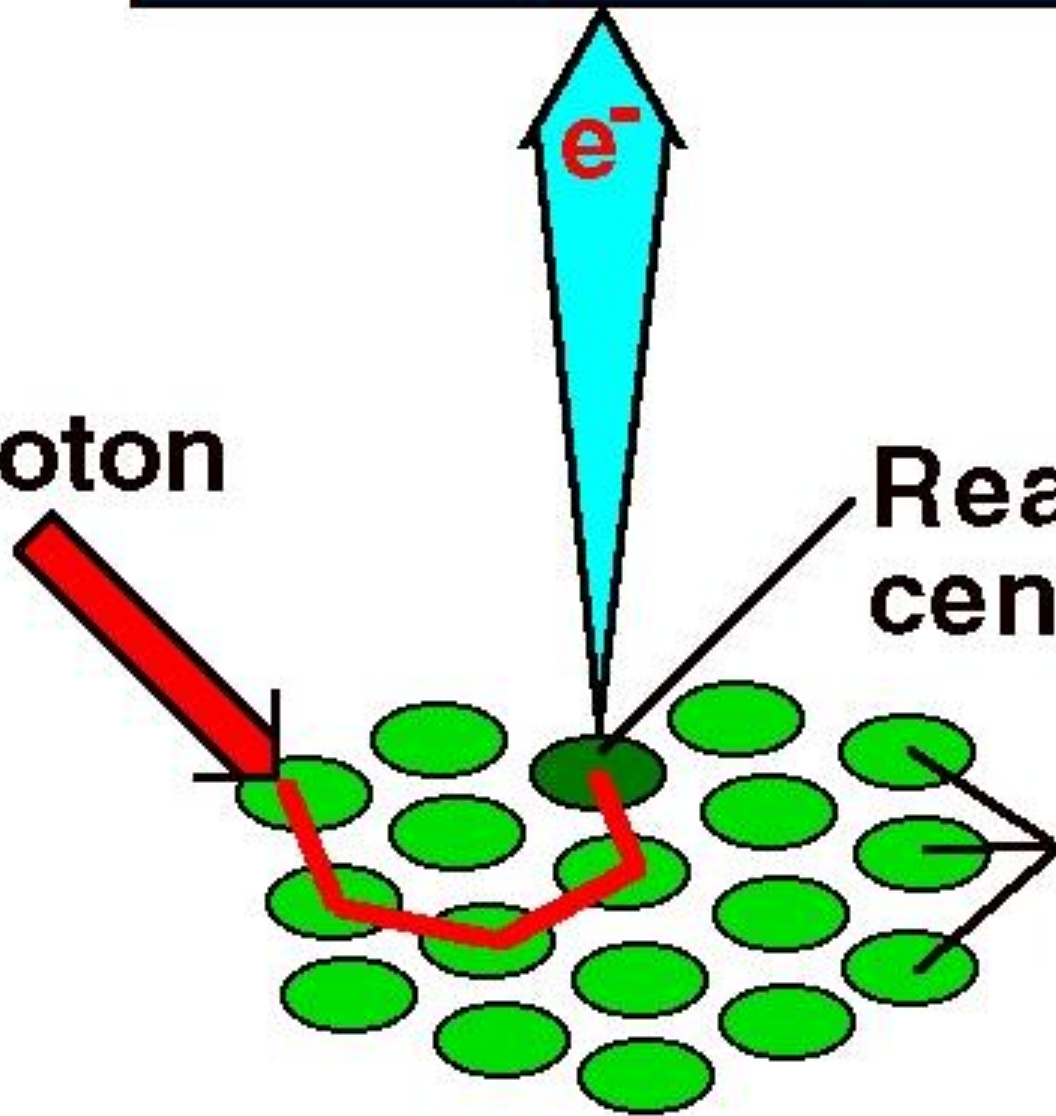
Primary acceptor

Photon

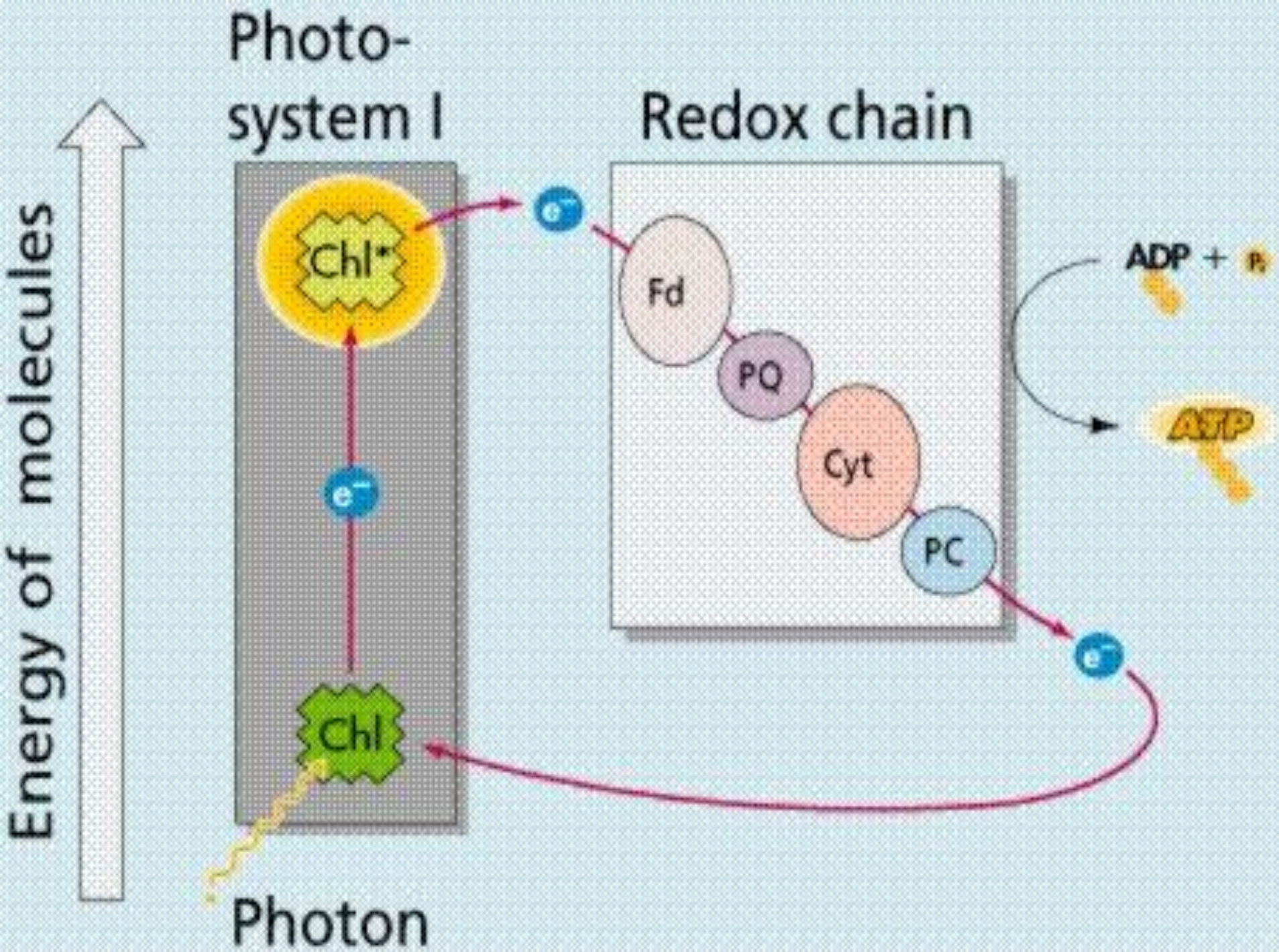
e^-

Reaction center

Pigment molecules



- **СЖК** - сәулелерді жинайтын кешен.
- **Хлорофилл а молекуласының жұпы** - СЖК- пигменттерінен өткен қозу энергияны ұстайтын аран
- Хлорофиллдің димерімен қатар фотосинтездік кешенге **бірінші және екінші электрон акцепторлары** кіреді.
- **Хлорофилл молекуласы бірінші акцепторға электронды беріп тотығады.** Ол электрон тасмалдайтын тізбекке түседі.



- **Фотожүйе** – фотосинтез аппаратының маңызды құрылымды-функциональды бөлімі.
- Ф/с процеске **2 фотожүйе** қатысады

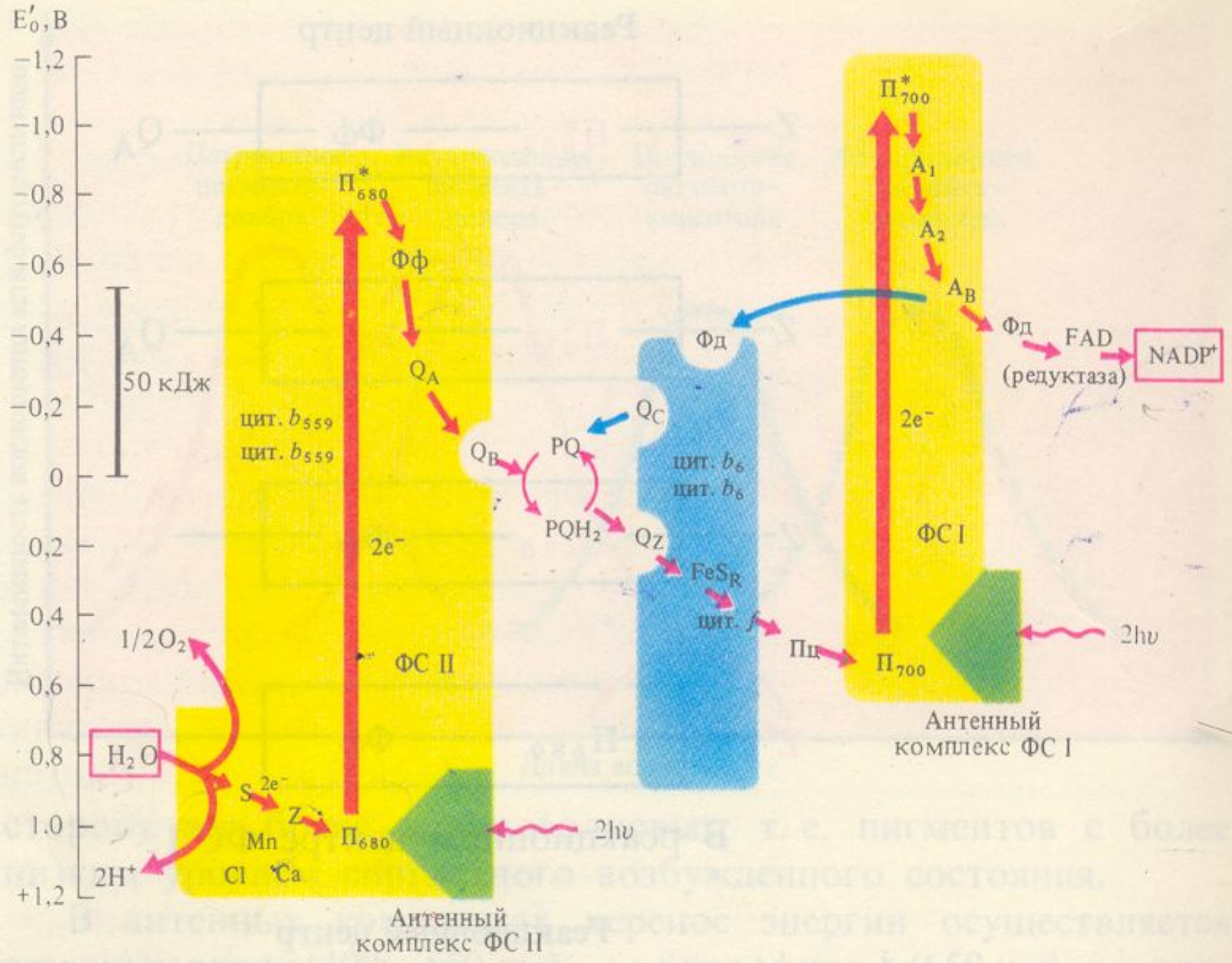
Фотожүйе

```
graph TD; A[Фотожүйе] --> B[Сәуле жинайтын комплекс]; A --> C[Фотохимиялық реакциялардың орталығы]; A --> D[Электрон тасмалдағыштар жиынтығы]
```

Сәуле
жинайтын
комплекс

Фотохимиялық
реакциялардың
орталығы

Электрон
тасмалдағыштар
жиынтығы



Реакциалық орталығы – пигменттің димері **P700**
(хлорофилл *a* с сіңіретін максимумы 700 нм)

*Хлорофилдер a 675-695, антенналық
компоненттер*

*хлорофилл a_{695} –нің мономерлік формасы (A1) –
бірінші электрон акцепторы*

*Екінші электрондық акцепторлар - A2 и Aв
(темір-күкірт белоктар - FeS).*

ФЖ1 сәуленің әсерінен суда
еритін **FeS** белок

ферредоксинді (Фд)

тотықсыздандырады және

құрамында мыс бар, суда

еритін белок **пластоцианинді**

(Пц) тотықтырады.

ФЖ 2

Реакциалық орталығы - хлорофилл Р 680

Антеналық пигменттер - хлорофиллдер

А 670-683

Феофетин *a* (Фф) – бірінші ретті электрон акцепторы, электрондарды бірінші **Пх-ға** береді

Ол **FeS (QA)**-мен байланысқан, содан соң екінші пластохинонға тасмалдайды (**QB**).

Суды тотықтыратын белок комплексі **S**,

S пен байланысқан және **P680**-ге электрон доноры болып келетін электрон тасмалдағыш **Z**.

Бұл комплекстің жұмысына **Mn, Cl, Ca** қатысады.

ФЖ2 - **Пластохинонді** тотықсыздандырады (**PQ**) және суды тотықтырады.

Онда оттегі **O₂** мен **протондар** бөлінеді.

ФЖ2 су ыдырайтын реакцияларға және оттегі бөлінетін реакцияларға жауапты

- ФЖ1 – НАДРН

- ФЖ2 – O_2

Электрон тасмалдағыш тізбек екі фотожүйені байланыстырады - белок цитохромдық - пластохинондық комплекс (фонд), $b - f$ комплекс және пластоцианин.

■ **ФЖ 2-нің** сәуле жинайтын комплексі және пигмент-белоктық комплексі тилакоидтардың жақын тұрған мембраналарында - **грana тилакоидтарда** - орналасады.

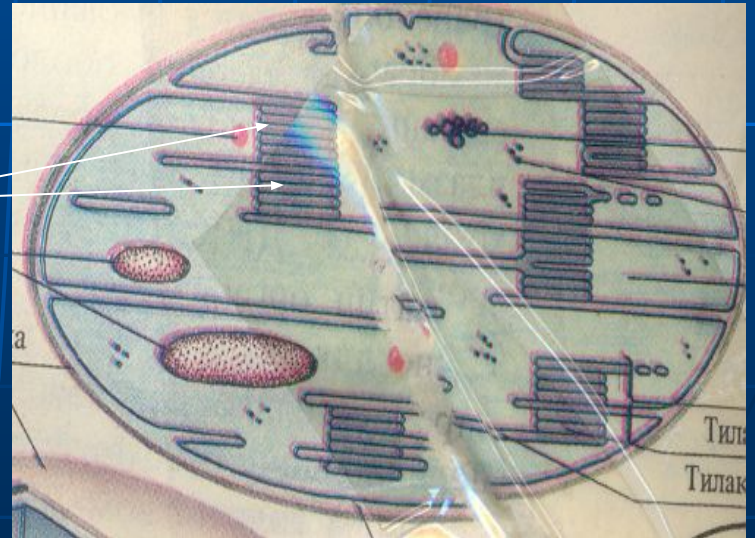
■ **ФЖ 1-нің** сәуле жинайтын комплексі, **АТРазалық комплексі (CF 1 + CF 0)** - бір біріне тимей тұрған хлоропластардың мембраналарында орналасқан – **строманың тилакоидтарында**.

ФЖ 2

**Сәуле
жинайтын кешен**

**Пигмент-
белоктық
кешен**

**Грана
тилакоидтарында**

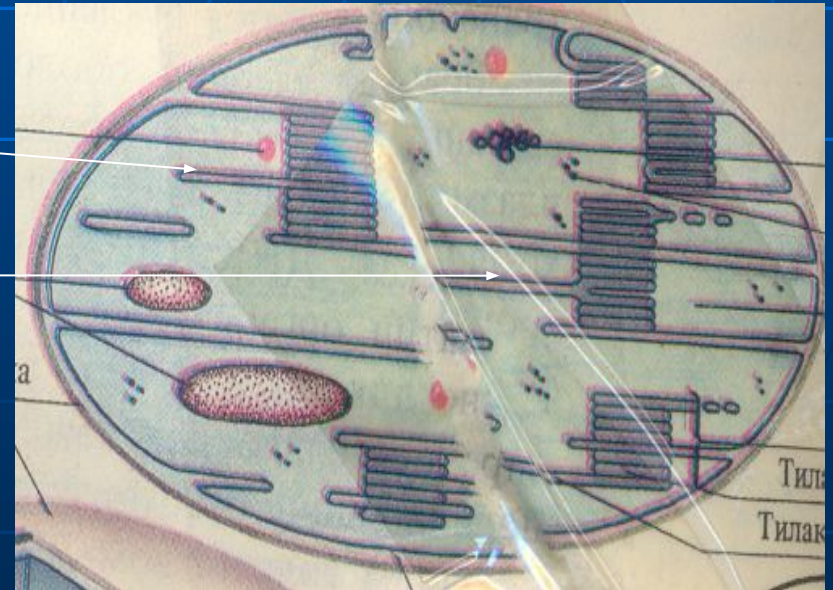


ФЖ 1

**Сәуле
жинайтын кешен**

**АТРазалық комплексі
(CF 1 + CF 0)**

**Строма
тилакоидтарында**



Цитохромдар комплексі ***b - f*** строманың және граналардың тилакоидтарында орналасқан.

Олар бір бірімен қалай қатынасады?

Олар бір бірімен липид фазада жылдам жүретін **липофильдік пластохинон PQ** арқылы қатынасады.

Ол ішкі мембрана бойы жылжиды, ал суда еритін **Фд** сыртқы бетінде жақсы жылжиды.

- Олар протондар мен электрондарды тасмалдайды, немесе тек протондарды.
- Протон немесе электрон беретін молекула **тотығады**, алатын – **тотықсызданады**.
- Электрон тасмалданудың 2 түрі бар: **циклді** /айналмалы/, **циклсіз** /айналмасыз/.

Айналмалы - тасмалдауда хл-лл молекуласынан бірінші акцепторға тасмалданған электрондар оған қайтып келеді.

- **Айналымсыз тасмалдауда** су фотототығады да электрондар судан НАДФ-қа тасмалданады.
- Тотығу-тотықсыздану реакцияларда бөлінетін энергия АТФтің синтезіне қолданылады.
- **Фотосинтездік фосфорлану** - сәуленің энергиясы АТФ-тің энергиясына айналу (Д. Арнон).
- Электрон тасмалданудың 2 түріне **циклді** және **циклсіз фотофосфорлану** сәйкес.
- .
-

- *Айналымсыз тасмалдануға екі ФЖ қатысады.*
- P_{680} -дегі электрондық тесік күшті **ТОТЫҚТЫРҒЫШ** болып істейді, ол бірнеше тасмалдағыш арқылы **Mn** пен **Cl** иондар қатысуымен судан электронды тартып алады

- Ол электрон П680 молекуласындағы тесікті бітейді. Су фотототтығады да оттегінің молекуласы бөлінеді.
- $4 h\nu$
- $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2$.
- ФЖ2 ден ФЖ1-ге тасмалдау.
- ФЖ2-де химиялы тұрақты қосынды су ыдырайды.

- P680 → Фф → бірінші акцептор → Пх / ол электрондарды және протондарды тасмалдайды / → б/f-комплекс / темір-күкірт белоктан Цх f-ке тасмалданады
- Цитохром тотығады $Fe^{2+} - e \rightarrow Fe^{3+}$.

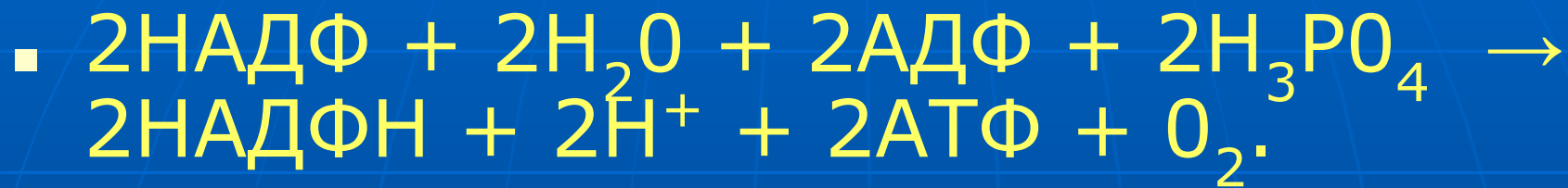
Келесі тасмалдағыш – Пц.

- Пц - құрамында мыс бар белок, бір молекула белогында 2 мыс атомы бар $Cu^{2+} + e \rightarrow Cu^+$.
- Пц - б/f-комплекті және ФЖ 1-ді байланыстыратын бөлік.
- Пц-нен электрон P_{700} -дің электрон тесігін бітейді.

- ФЖ2- тотыққан P_{680} - күшті тотықтырғыш.
- Соның арқасында ФЖ2 су ыдырайды, оттегі бөлінеді
- ФЖ2-ге кіретін су ыдырататын комплекс
- **СЫК**- активтік орталығының құрамында марганец (Mn^{2+}) иондар тобы бар, олар **П680-ге** электрон донорлары болып келеді, **Mn** иондары оң зарядтарды сақтайды, олар судың тотыққан реакцияларына қатысады:
 - $2\text{Mn}^{4+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Mn}^{2+} + 4\text{H}^+ + 4\text{e} + \text{O}_2$.

- Су ыдырататын комплекстен П680-ге 4 электрон тасмалданғаннан кейін судың 2 молекуласы ыдырайды, оттегінің 1 молекуласы және 4 сутектің протоны бөлінеді.
- Олар тилакоидтың арасындағы кеңістікке шығады.
- Электронның ФЖ2 ден ФЖ1-ге тасмалдағыштар арқылы тасмалданғанда АДФ–тен және аорганикалық Ф-дан АТФ түзіледі.
- $\text{АДФ} + \text{Фан} \rightarrow \text{АТФ}$

- *Айналымсыз фотофосфорланудың теңдігі :*



- *Айналымсыз фотосинтездік фотофосфорланудың айырмашылығы:*

- 1) судың 2 молекуласы тотығады;
- 2) 2 фотожүйе қатысады;
- 3) электрондар су молекуласынан (бірінші донор) электрон тасмалдағыш тізбек арқылы НАДФ (соңғы акцептор)-қа тасмалданады.

- **Айналымсыз** фотофосфорланудың өнімі:
- 1. Тотықсызданған никотинамидадениндинриуклеотидфосфат (НАДФН + Н)
- 2. *АТФ.*
- Олар ФС-дің қараңғы сатысында қолданылады.

- **Айналмалы фотофосфорлануға тек ФЖ1 қатысады.**
- $P700 \rightarrow$ бірінші тасмалдағыш \rightarrow $\Phi_d \rightarrow P_{700}$
- Электронтасмалдағыш тізбекте **цитохром b** мен **цитохром f** –тің арасында **АТФ** түзеледі.

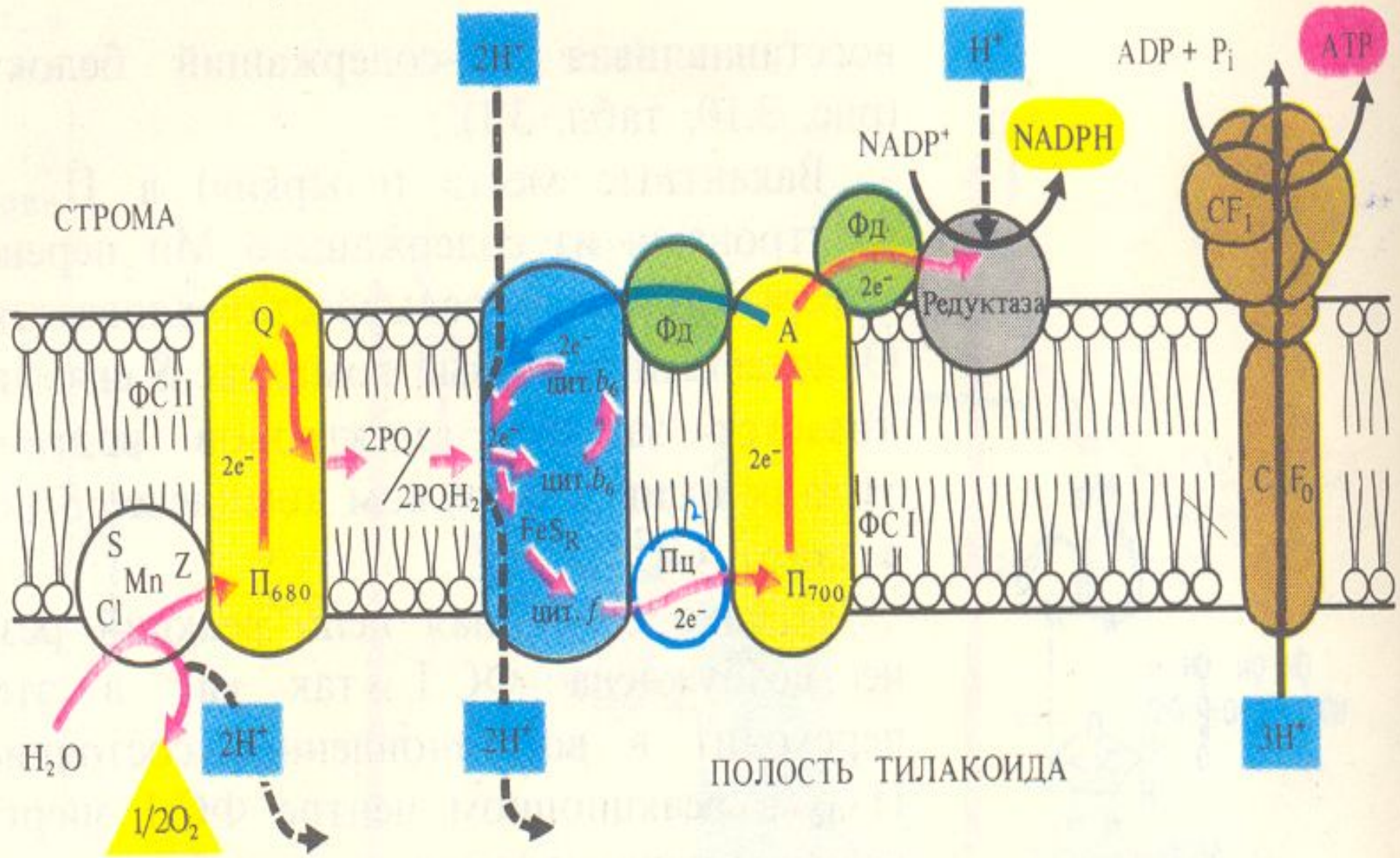
- Бұл жағдайда P_{700} донор да, акцептор да болып келеді.
- Айналмалы фотосинтездік фотофосфорланудың суммардық теңдігі:
- $АДФ + Н_3РО_4 + h\nu \rightarrow АТФ + Н_2О.$

- П.Митчеллдің хемиосмоттық теориясы (ағылшын биохимик).

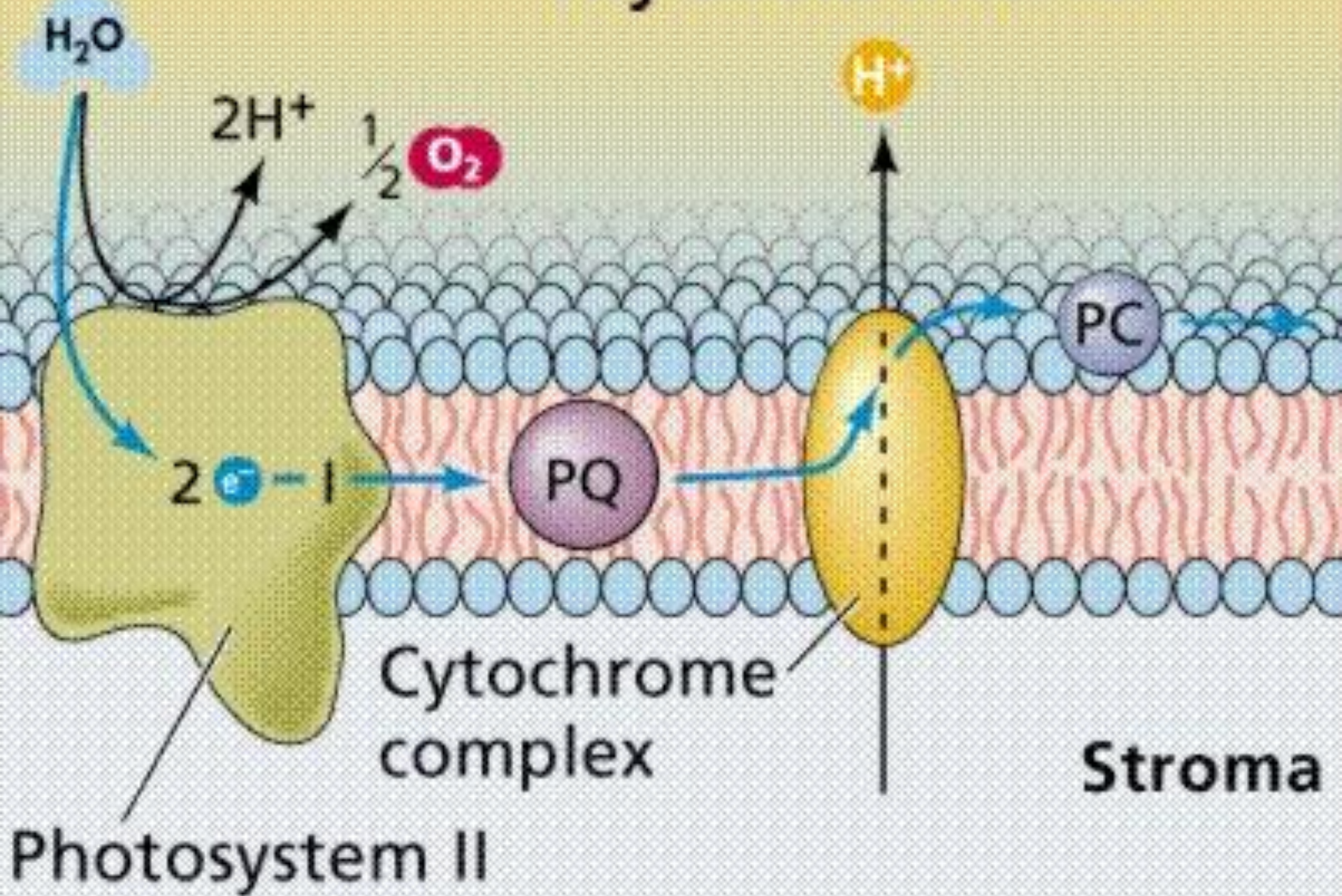
- **Электрон тасмалдағыштар** (электронтасмалдағыш тізбек) мембраналарда ассиметриялық орналасқан.

- Сонда тек электрондарды тасмалдайтын тасмалдағыштар (*цитохромдар*) және электрон мен протондарды тасмалдайтын тасмалдағыштар (*пластохинондар*) кезек орналасқан.

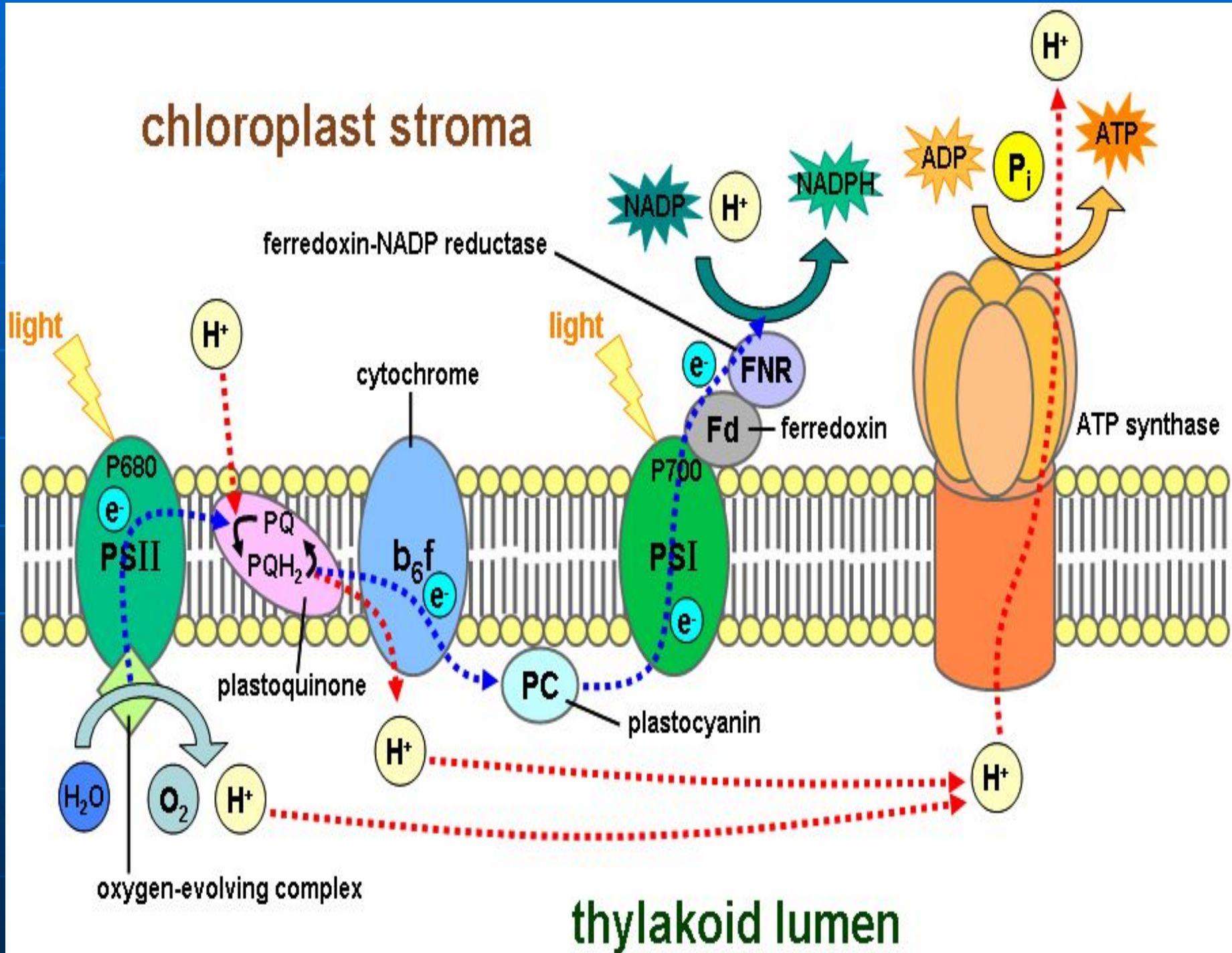
3. ФОТОСИНТЕЗ

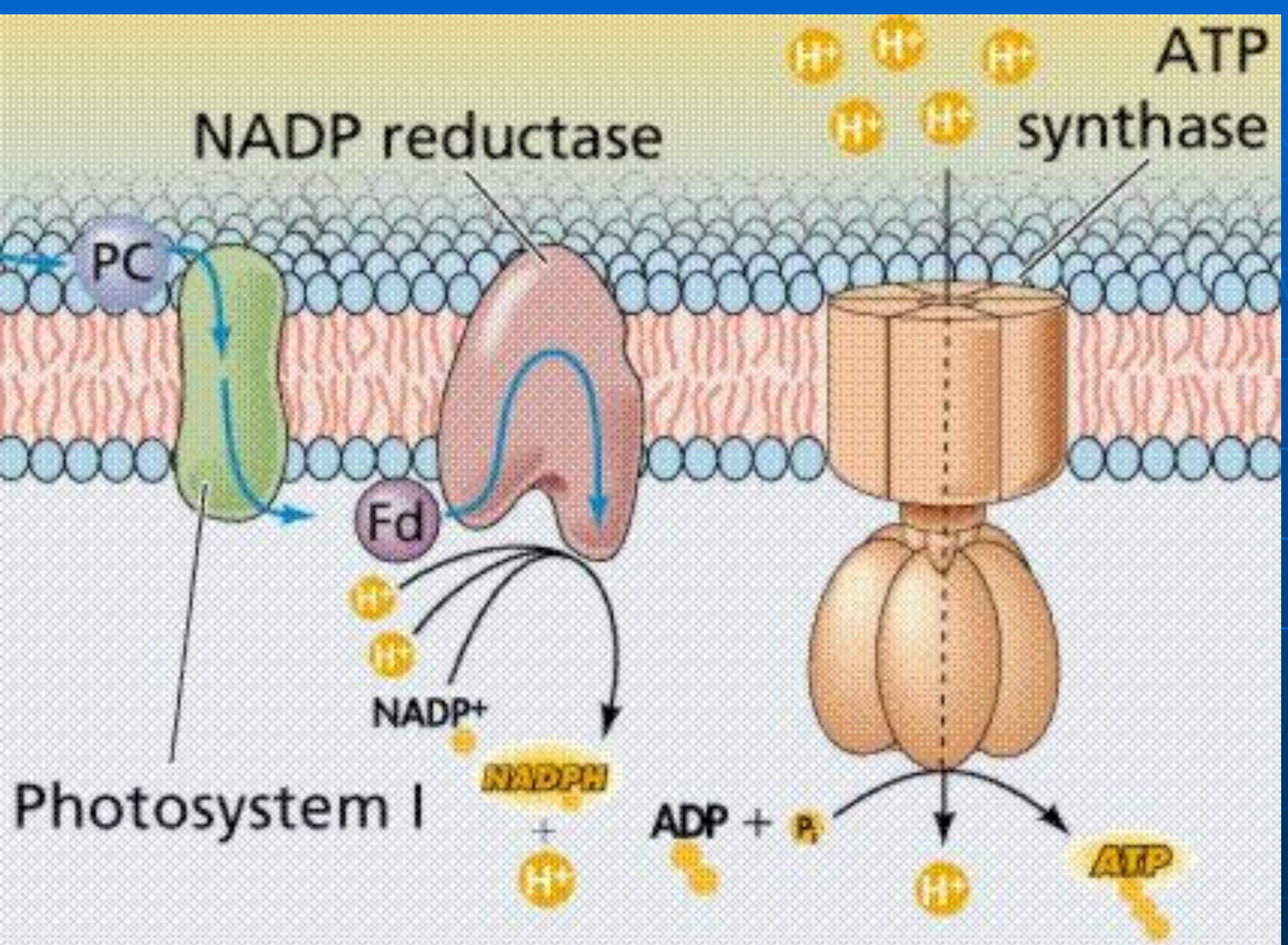


Thylakoid interior



chloroplast stroma





- Сәуленің 2 квантын сіңіргенде 2 эл-н (кезекпен) P_{680} -нен шығып, мембранадан өтеді, орынына электрондар судан келеді.
- Онда протондар судан тилакоидтардың ішкі кеңістігіне шығады; ал оттегінің атомы хлоропласттан шығып кетеді

- Электрондар П680-нен мембрананың сыртқы жағындағы акцепторға тасмалданады. Ол акцептордың аты - *пластохинон (ПХ)*.
- *Пластохинон* — хинонның туындысы, тотыққан кезде құрамында 2 оттегінің атомы бар, олар көміртек сақинамен қос байланыспен байланысқан.
- Тотықсызданған күйінде оттегінің атомдары бензол сақинасында протонмен байланысқан.
-
- Гидрохинон \longrightarrow $+2e+2H$ \longrightarrow Хинон

- Px молекуласы басында 2 электрон қабылдайды: $\text{PX} + 2\text{e} \rightarrow \text{PX}^{2-}$.
- PX^{2-} протонға химиялық өте жақын - протондарды стромадан алады электрлік нейтральды күйін түзеді:
$$\text{PX}^{2-} + 2\text{H}^+ + \rightarrow \text{PX} \cdot \text{H}_2$$
- Px жылжымалы, 2 электронның және 2 протондың тасмалдағышы болып келеді және ол тилакоидтың мембранасында оңай жылжиды.
- Ол ФЖ2 –нің басқа электрон-тасмалдағыш кешендермен байланысын қамтамасыз етеді.

- Сонымен, Хл_{680} -тен Хл.700 -ге 2 электрон тасмалданғанда тилакоидтардың ішкі кеңістігінде протондар жиналады.
- Протондардың стромадан тилакоидтардың ішкі кеңістігіне активтік тасмалданудың нәтижесінде мембранада сутектің электрохимиялық потенциалы құралады ($\Delta\mu\text{H}$).
- Ол екі компонентерден тұрады:
- **Химиялы** - ΔpH (концентрациялық),
- **Электрлік** - мембрананың 2 жағында қарсы зарядтар жиналғандықтан түзіледі (ішкі мембрананада протондар жиналғанның арқасында).

- Протондар мембрананың бір жағында жиналған арқасында мембранада түзелген энергия 2 компоненттен тұрады - химиялық және электрлік.
- Осы энергияны пайдалану үшін протондарды кері қайтадан тасмалдау керек.
- Содан шыққан энергия АТФ синтезіне пайдаланады.

- Протондардың мембранадан диффузиясы **АТФ-синтаза** деген ферменттік комплекс арқылы жүреді /сопрягающий фактор/.
- Бұл комплекстің түрі саңырауқұлаққа ұқсайды, 2 бөліктен тұрады:
 - - домалақ қалпақтан **F₁**, ол мембрананың сыртқы жағынан шығып тұрады (онда ферменттің каталитикалық орталығы орналасады),
 - - және аяғынан **F₀**, мембранаға кіріп тұратын.
- Мембрандық бөлігі полипептидтік субъекдиницалардан тұрады, ол мембранада протондық канал түзеді, олар арқылы сутектің иондары **F₁**-ге барады.

- Белок **F1** – ол белоктық комплекс, 5 субъединицалардан тұрады: **α , β , γ , δ , ϵ** . Белоктық комплексті мембранада оңай бөлуге болады.
- АТФсинтазаның жұмысы АТФ синтезделгенде протондардың тасмалдануымен байланысты. Протондар F_0 –ден F_1 -ге қарай жүреді. Бағытталған тасмалдау тек АТФсинтаза мембранамен байланысқанда ғана жүреді.

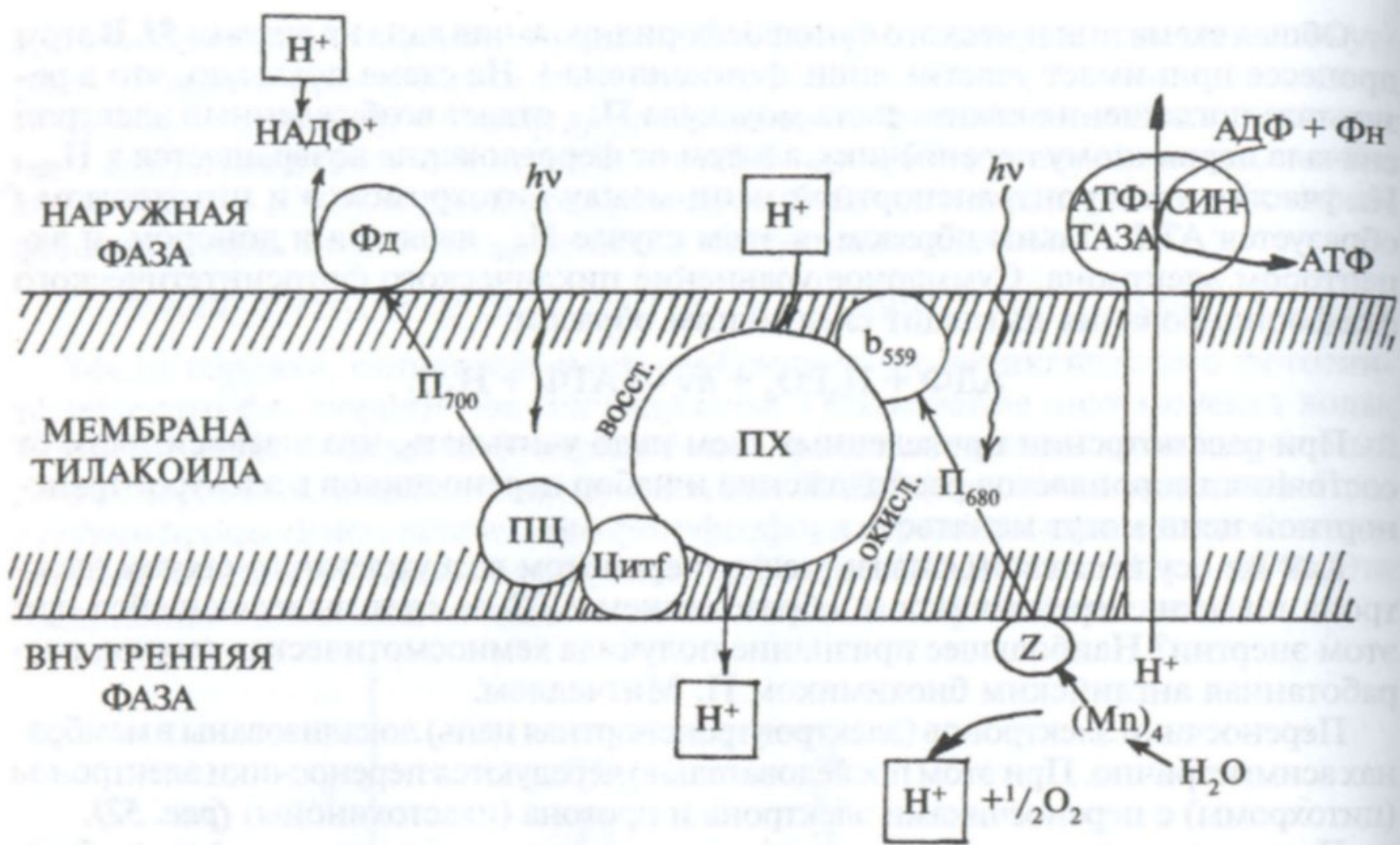


рис. 52

Схема образования мембранного потенциала и переноса протонов во внутритилакоидное пространство:

Фд — ферредоксин; ПЦ — пластоцианин; ПУ — пластохинон; b — c — цитохромы

- **Фосфорланудың механизмі туралы 2 гипотеза бар** (тікелей және жанама).
- **1-ші гипотеза** – фосфаттық топ және АДФ ферментпен F1 комплекстің активтік бөлікте байланысады.
- 2 протон каналмен концентрация градиенті бойынша жүреді, фосфаттың оттегімен байланысып, **су түзеді**. Осы реакция фосфатты тобын өте активті қылады да, ол АДФпен байланысады. Сол уақытта **АТФ түзеледі**.
- **2-ші гипотеза (жанама механизм)** – ферменттің активті орталығында (фактор F1-нің субъединицалары α и β) АДФ пен **Ф** қосылады. Түзелген АТФ ферментпен қатты байланысқан, оны босату үшін энергия қажет.
- Энергия протондармен тасмалданады, протондар ферментпен байланысып (протондану), ферменттің конформациясын өзгертіп, АТФ-ті босатады.
- **Сәуленің энергиясы сақталған жарық сатысының өнімі - АТФ және НАДФН.**
- **Д. Арнон** оны **ассимиляциялық күш** деп атады.
- Себебі олар CO_2 - көмірсуларға дейін тотықсызданатын қараңғыдағы фазада пайдаланылады.

1. Реакциялық орталық дегеніміз...

1. Тилакоидтағы орын
2. Грана бөлігі
3. P 700 және P 680 пигменттерінің белокпен жинағы
4. Антенналық пигмент-белок жинағы
5. Суды тотықтырғыш пигмент-белок жинағы

2. Фотосинтез барысындағы оттегінің шығу тегі...

1. Көмірқышқыл газынан
2. Глюкозадан
3. Судан
4. Крахмалдан
5. Фосфоглицерин қышқылынан

3. Фотосинтездің жарықтағы сатысы қайда өтеді?

1. Хлоропластың стромасында
2. Хлоропластың ішкі мембранасында
3. Хлоропласт тилакоидтарында
4. Хлоропластың сыртқы мембранасының пигмент-белок жинағында
5. Хлоропласт матриксінде

4. I фотожүйеге кірмейді

- | | |
|---------------------------|-----------------|
| 1. НАДФ | 4. Пластоцианин |
| 2. P700 | 5. Пластохинон |
| 3. темірлі-күкіртті белок | |

5. Фотосинтездің жарық сатысының өнімі...

1. Көмірсу (қант)
2. Оттегі
3. Су
4. Көмірқышқыл газы
5. НАДФН