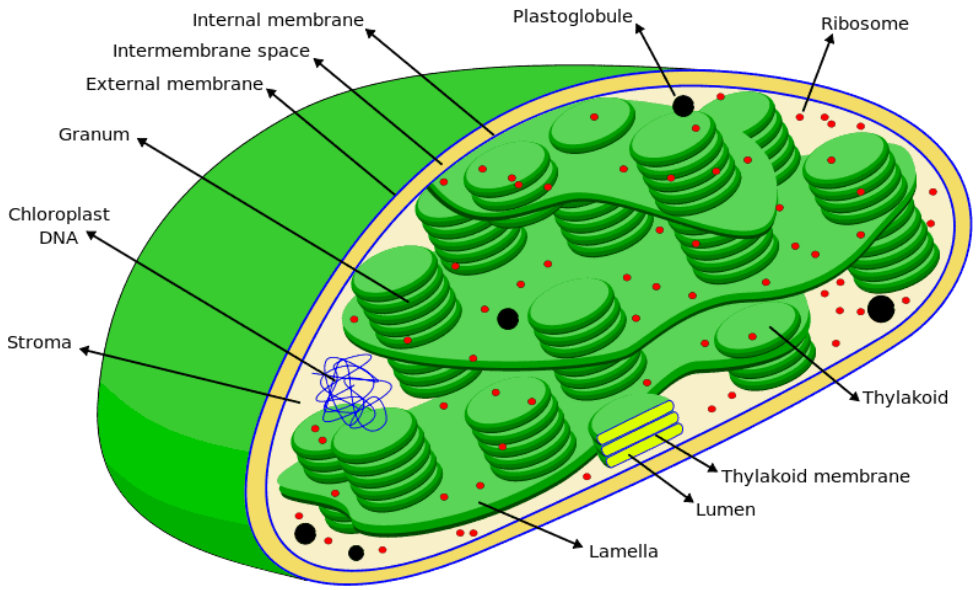
التركيب الضوئي Photosynthesis

النباتات الخضراء تختلف عن معظم الكائنات الأخرى بكونها ذاتية التغذية Autotrophic أي إنها تصنع غذائها بنفسها من خلال تحويل ثاني اوكسيد الكاربون اللاعضوي الى مواد عضوية سكرية داخل البلاستيدات الخضراء بمساعدة الطاقة الضوئية بعكس الحيوانات والإنسان التي تعتمد في غذائها على المصادر الجاهزة للمواد الغذائية العضوية المجهزة من النبات ولهذا تسمى Heterotrophic .

لحدوث عملية التركيب الضوئي يجب توفر العناصر الأساسية المساهمة في انجازها والمتمثلة في الماء الذي يجهز من خلال الشعيرات الجذرية وخلايا البشرة المجاورة للشعيرات الجذرية بشكل أساس، أو من ما يمتصه الجزء الخضري بشكل ثانوي، وثاني اوكسيد الكاربون الذي يجهز من المحيط الخارجي للنبات بشكل أساسي أو من ما ينتجه النبات خلال عمليات التنفس الخلوي، اضافة للبلاستيدات الخضراء والضوء، ولأجل فهم عملية التركيب الضوئي بشكل أوسع يجب دراسة و توضيح ما يلي:

أ - البلاستيدة الخضراء Chloroplast:

هي عبارة عن جسيمة حية (عضية) سايتوبلازمية تمثل المركز الذي تتم فيه عملية التركيب الضوئي حيث تنتظم فيها جزيئات الكلوروفيل والأصباغ المساعدة الأخرى بنظام خاص يسمح بنقل الطاقة ما بين جزيئات الصبغات التي تمتص الضوء وتحوله الى عدة جزيئات أخرى قبل أن تصل الى مكان تأثيرها، فقد تتحول الطاقة الضوئية من جزيئة كلوروفيل a الى جزيئة كلوروفيل a أخرى؛ أو من جزيئة كلوروفيل b الى جزيئة كلوروفيل a أو من جزيئة كاروتين الى جزيئة كلوروفيل a .لقد كشف المجهر الالكتروني بان البلاستيدات الخضراء (chloroplast) محاطة بزوج من الأغشية ينطوي (ينبعج) الداخلي منها للداخل من عدة أماكن ليكون النظام الصفائحي للبلاستيدة و هو المسؤول عن تفاعلات الضوء (التفاعلات الكيموضوئية) وذلك لاحتوائه على صبغات الكلوروفيل وأشباه الكاروتينات.



يتكون النظام الصفائحي من صفائح أو أكياس تسمى البذيرات Granum ، وعند اجتماع اثنين أو أكثر منها يتكون ما يسمى بالبذيرة Grana وهي جمع كلمة Granum وعند امتداد احد الأكياس أو الصفائح العائدة لبذيرة معينة خلال حشوة البلاستيدة واتصالها بكيس أو صفيحة أخرى تعود الى بذيرة ثانية يتكون ما يسمى بالصفيحة الحشوية Stroma Lamellae. فراغ البلاستيدة المسمى Stroma أو Matrix هو عبارة عن سائل ذات طبيعة غروية لاحتوائه على البروتينات والأنزيمات ويشترك في تفاعلات الظلام (الكيموحرارية) الخاصة بتثبيت ثاني أوكسيد الكاربون خلال عملية التركيب الضوئي.

ب- الطاقة الضوئية Light energy :

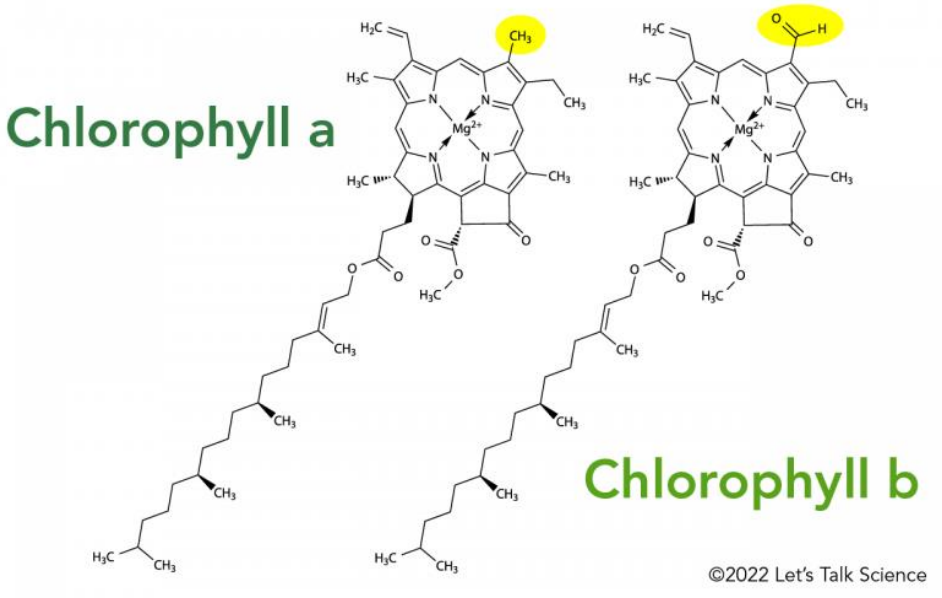
عبارة عن موجات ذات طبيعة دقائقية (أي تتكون من دقائق) عرفت بالفوتونات Photons أو الكمات quantums وهذه الفوتونات أو الكمات تمتلك تردد وطاقة وطاقتها تتناسب عكسياً مع طول موجتها الضوئية.

ج- الصبغات النباتية Plant Pigments :

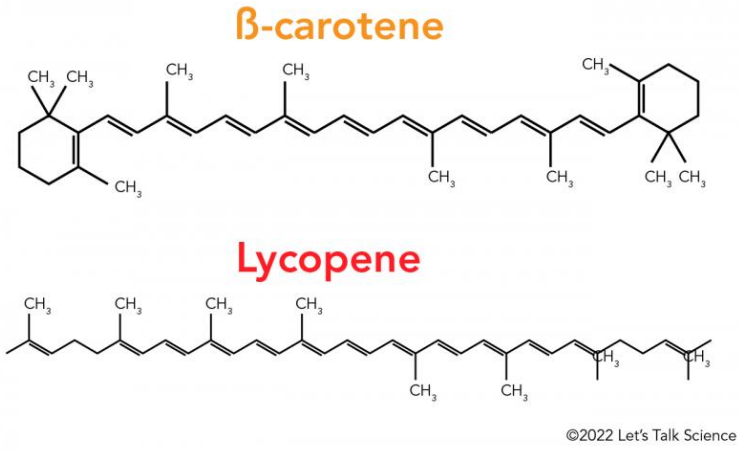
عبارة عن جزيئات كيمياوية تمتص نطاقات معينة من أطوال الموجات الضوئية وبكفاءة عالية ولا تمتص أطوال موجات أخرى ولهذا تظهر بألوان مختلفة (علماً بان الضوء الأبيض العادي هو خليط من الموجات كلها). بشكل عام تصنف الاصباغ النباتية الى اربعة فئات هي chlorophylls, carotenoids

anthocyanins, و betalains ، أن امتصاص الطاقة الضوئية من قبل البلاستيدات الخضراء يتم بواسطة الصبغات Pigments التي تحتويها البلاستيدات والتي تصنف الى :

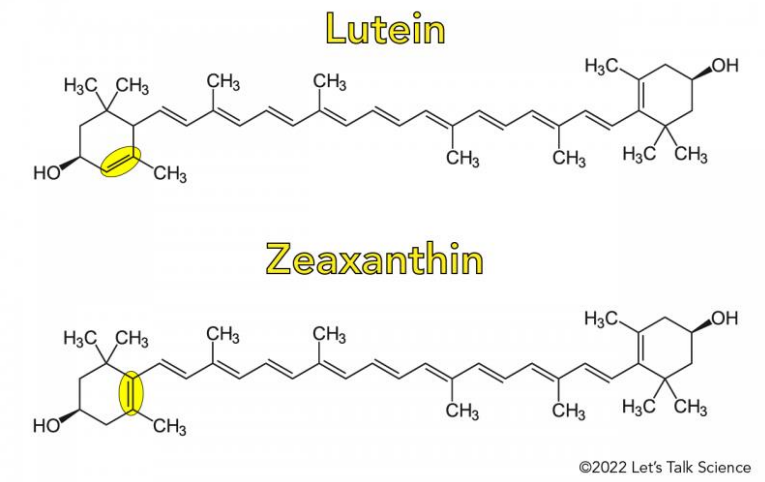
1- الصبغات الرئيسية : و تشمل صبغات الكلوروفيل وخاصة (a الخضراء المزرقة) و (b الخضراء المصفرة) والتي تشكل حوالي ٦٥٪ من الصبغات الموجودة في البلاستيدات الخضراء.



2- الصبغات المساعدة أو ما يسمى بأشباه الكاروتينات و تشمل صبغات **الكاروتين** (ذو اللون الأصفر - البرتقالي - الأحمر). بيتا كاروتين مسؤول عن اللون البرتقالي في الجزر والبطاطا الحلوة. تظهر أوراق الخريف باللونين الأحمر والأصفر بسبب ظهور الكاروتينات، يحدث هذا عندما يتحلل الكلوروفيل استجابة لأشعة الشمس الأقل.

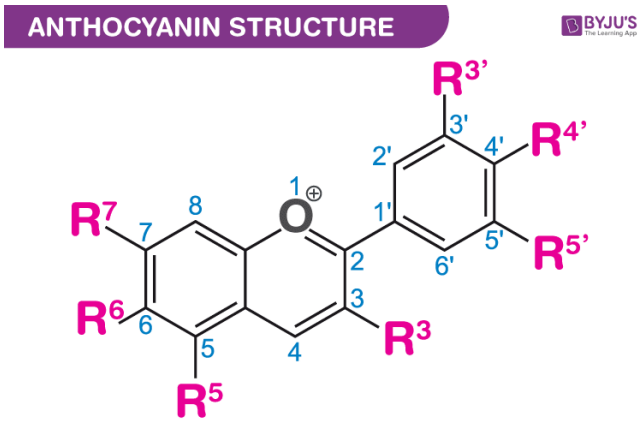


والزانثوفيل Xanthophyll (ذو اللون الأسمر أو البني واللذان يشكلان نسبة 6% و 29٪ على التوالي من الصبغة الموجودة في البلاستيدة الخضراء.

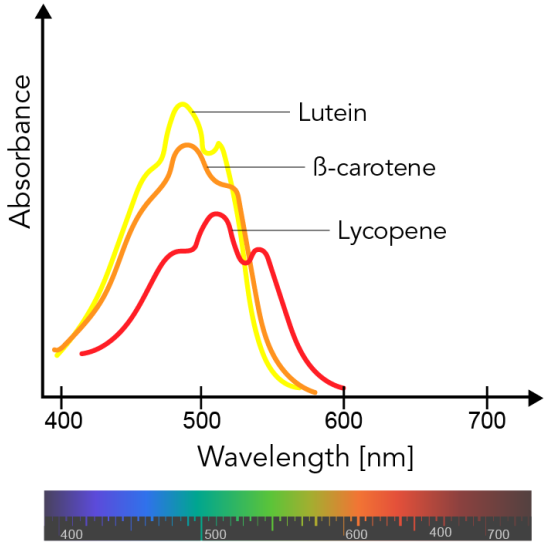


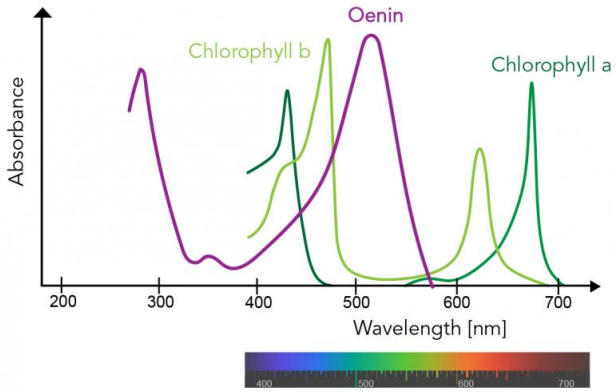
يحتوي الزانثوفيل على أصباغ مثل اللوتين وزياكسانثين لديهم تركيب كيميائي مشابه للكاروتين، لكن لديهم جزيئات أوكسجين إضافية، لهذا كل أسمائهم تنتهي بـالمقطع in- . تم العثور على Xanthophylls في العديد من الخضار الخضراء، وفي بعض الزهور، وتستخدم بعض الزانثوفيلات كملون غذائي.

كما ام هناك مركبات **الفلافونويد Flavonoids** وهي من عوائل المركبات الموجودة في النباتات، اذ أنها تنتج أللوان الأحمر والأصفر والأزرق والأرجواني، وان النوع الأكثر شيوعًا من الفلافونويد هو الأنثوسيانين anthocyanin الموجود في فجوات الخلايا. يرجع اللون الأحمر في الورود والتفاح والكرز والملفوف الأحمر إلى الأنثوسيانين.



أن كل من الصبغات الرئيسية والمساعدة نشطة ضوئياً وتساهم بشكل فعال في اسر الطاقة الضوئية حيث أن عملية التركيب الضوئي تستخدم جميع الأطوال الموجية ضمن الطيف المرئي لكن أكثر الموجات الضوئية تأثيراً على أحداث التركيب الضوئي هي الزرقاء والحمراء والتي تمتص من قبل جزيئات كلوروفيل a و b بكفاءة عالية أما الموجات الضوئية التي تقع ضمن المناطق الوسطى للطيف المرئي (الموجات الضوئية الخضراء) فإنها تمتص بصورة رئيسية من قبل أشباه الكاروتينات التي لا تمتلك القدرة على استخدام الطاقة الضوئية الممتصة من قبلها لذلك تحولها الى جزيئات الكلوروفيل لكي تستخدمها في عمليات التركيب الضوئي.





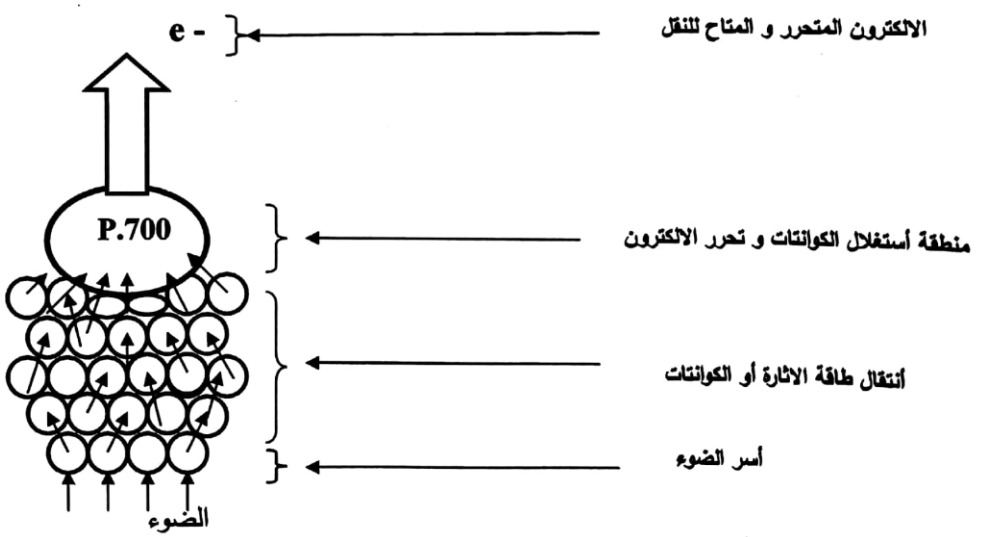
تهيج الصبغات Irritation of pigments :

عند امتصاص الصبغات المشتركة في عمليات التركيب الضوئي للضوء فان الفوتونات أو الكمات التي يحتويها الضوء سوف تؤدي الى تنشيط وتهييج الالكترونات التي تدور في أفلاك الصبغات وعندئذ ترتفع هذه الالكترونات محملة بالطاقة الى مستوى أعلى وعند عودتها الى حالتها الأصلية بعد مرور مدة قصيرة (10^{-9} ثانية) فإنها تفقد الطاقة الزائدة وبأشكال مختلفة فينتقل جزء منها الى مركبات كيمياوية خاصة تسمى حوامل الالكترونات مثل NADP فيختزل الى NADPH2 وذلك من اجل تكملة عملية التركيب الضوئي

ويخزن الجزء المتبقي من الطاقة الزائدة بشكل مركبات غنية بالطاقة مثل مركب الأدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP) بعد أن يتحد مركب الأدينوسين ثاني الفوسفات (ADP) مع حامض الفوسفوريك.

وحدة التركيب الضوئي Photosynthetic Unit :

لقد اعتقد الباحثون الأوائل في التركيب الضوئي بان امتصاص وتحول الطاقة الضوئية الى طاقة كيمياوية يتطلب وجود بلاستيدة خضراء كاملة النمو والتركيب، لكن لوحظ من التجارب بان وجود أجزاء صغيرة من البلاستيدة يكفي لحدوث التركيب الضوئي وهذا يشير الى إمكانية تكون البلاستيدة من وحدات صغيرة تسمى وحدات التركيب الضوئي وهي تمثل اصغر مجموعة من جزيئات الصبغات المتقاربة من بعضها وبترتيب هندسي منتظم وتتعاون مع بعضها في امتصاص الطاقة الضوئية ونقلها إلى مكان استغلالها حيث يحدث انطلاق أو تحرر الالكترونات (شكل ادناه).



المحتويات غير النشطة ضوئياً في البلاستيدة The photosynthetically inactive contents of the plastid :

مما سبق اتضح بان أصباغ الكلوروفيل وأشباه الكاروتينات تمثل مواد نشطة ضوئياً في البلاستيدة وتساهم بشكل فعال في أسر الطاقة الضوئية، لكن هذا لا يكفي لتكملة حدوث عملية التركيب الضوئي بل يتطلب

الأمر الى إسهام مركبات كيمياوية تساعد في نقل الإلكترون والتي تسمى بالمواد غير النشطة ضوئياً وتشمل:

ا- السايتوكرومات Cytochromes : هي مركبات بروتينية ويوجد منها في البلاستيدة سايتوكروم f (Cyt.f) وسايتوكروم b (Cyt.b) .

ب- الفيرودكسينات Ferrodoxins : مركبات تحتوي الحديد وتقوم بنقل الكترون ولها القدرة على اختزال مواد أخرى.

ج- الكوينويدلات Quinone: هي اصباغ حيوية يوجد منها في البلاستيدة الخضراء مجموعة كبيرة ومن أمثلتها Plastoquinone (PQ) هو مركب عضوي حامل للإلكترون يلعب دورًا أساسيًا في عملية التمثيل الضوئي حيث يشارك في التدفقات الإلكترونية الخطية والبديلة، اذ يعاني تفاعلات الأكسدة والاختزال بسبب نقله الالكترونات. :ما ان فيتامين K يعمل كحامل للإلكترونات وربما يقوم بعملية الأكسدة والاختزال ايصاً.

مراحل عملية التركيب الضوئي

سابقاً كان يعبر عن عملية التركيب الضوئي بالمعادلة أدناه

$$6CO_2+6H_2O \xrightarrow[\text{كلوروفيل}]{\text{طاقة ضوئية}} C_6H_{12}O_6+6O_2$$

لكن حديثاً ثبت عدم صحة هذه المعادلة لان بموجبها كان يعتقد بان مصدر O_2 الناتج من عملية التركيب الضوئي هو من CO_2 كلياً أو من كل من CO_2 والماء معاً. لكن الدراسات أثبتت بان مصدر O_2 الناتج هو الماء فقط حيث يحدث انشقاق ضوئي الماء Photolysis واستناداً إلى ذلك فإن المعادلة تكون بهذا الشكل:

$$6CO_2+6H_2O+12H_2O \xrightarrow[\text{كلوروفيل}]{\text{طاقة ضوئية}} C_6H_{12}O_6+6O_2+6H_2O$$

أن التعبير عن عملية التركيب الضوئي بمعادلة كيمياوية واحدة لا يوضح جميع الحقائق المتعلقة بما يحدث داخل البلاستيدة، أي لا يبين بشكل واضح التغيرات التي تحدث للمواد اللاعضوية حتى تتحول إلى مواد عضوية خاصة وان التجارب قد أثبتت بأن عملية التركيب الضوئي تحوي مرحلتين؛ مرحلة ضوئية واخرى لاضوئية وهذا ما تؤكده الأدلة التالية:

الأدلة العلمية لوجود مراحل الضوء والظلام في عملية التركيب الضوئي:

ا- تجارب الضوء المتقطع للعالم واربرغ Worburg : لقد توصل هذا الباحث الى أن معدل عملية التركيب الضوئي للنبات تحت الضوء المستمر ولفترة زمنية معينة هو اقل من معدل التركيب الضوئي لنفس النبات عندما يستلم نفس الكمية من الضوء لكن بصورة منقطعة تفصلها فترات ظلام. ولتفسير هذه الحالة وضع النموذج التالي:

A ——— تفاعل اول ———→ B ——— تفاعل ثاني ———→ C

حيث أن A : هي نقطة بدأ عملية التركيب الضوئي والمتمثلة بتفاعل الماء مع CO_2

B: هي نقطة وسطية في عملية التركيب الضوئي حيث يتكون خلالها مركبات وسطية

C :هي نقطة انتهاء عملية التركيب الضوئي و تكون نواتجه النهائية مثل $C_6H_{12}O_6$

فعند تعرض النبات الى ضوء مستمر ذو شدة عالية يكون التفاعل من A الى B أسرع من التفاعل في تحول B الى C ونتيجة للتباين في معدل سرعة التفاعلين فسوف يحدث تراكم في B وان زيادة تكوين B سوف لا يؤثر على معدل تكوين C طالما كان التفاعل الثاني من (B الى C) لا يملك القدرة على استخدام كل B المتوفر له عن طريق التفاعل الأول (بسبب قلة سرعته). وعلى هذا الأساس يحدث خلال عملية قطع الضوء تحول B الى C والتي يكون خلالها التفاعل الأول متوقف أو قليل (بسبب عدم توفر الضوء) وهكذا فان استخدام الضوء المنقطع سوف يؤدي الى تكوين كمية أكبر من C. أما عند نمو النباتات تحت شدة إضاءة واطئة فيكون معدل تكون B من A واطئ واقل من تحول B الى C. مما سبق يتضح بان التفاعل الأول (من A الى B) هو المحدد لمجمل تفاعلات التركيب الضوئي وهو تفاعل كيموضوئي أي يتطلب وجود الضوء لحدوثه بشكل أساسي.

1- تجارب درجة الحرارة

وجد أيضا من التجارب بان درجة الحرارة لا تؤثر في التفاعلات الكيموضوئية (التفاعل الأول لكنها تؤثر في التفاعلات الكيموحرارية (التفاعل الثاني) فعند نمو النبات تحت شدة إضاءة عالية يزداد تكون B من A وعند زيادة درجة الحرارة تحت هذه الظروف يحدث زيادة في تكوين C من B.

2- اخذ CO_2 خلال الظلام

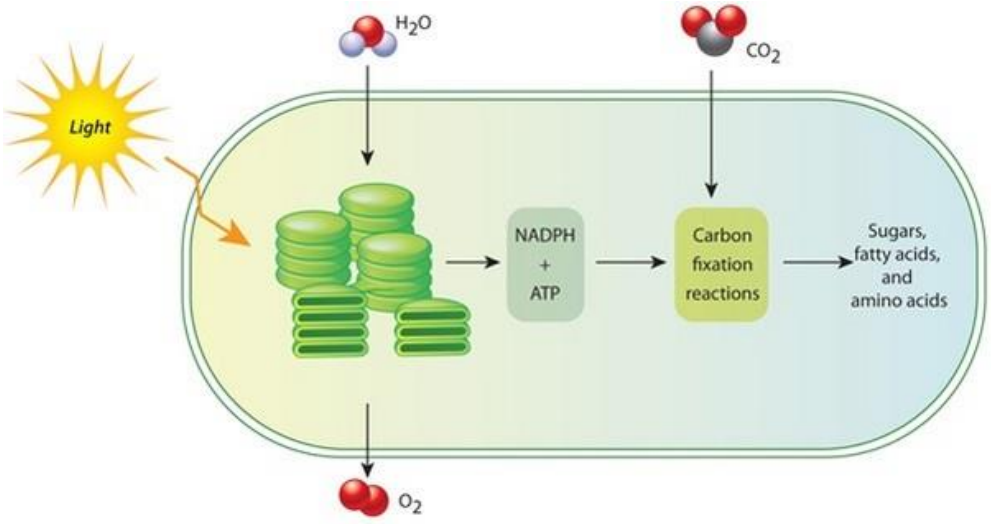
وجد من خلال التجارب بان وضع مجموعة من النباتات تحت شدة ضوء عالية وفي جو خالي من CO_2 يودي الى تراكم بمادة B وبشكل ملحوظ لكن هذه المادة تزول بشكل تدريجي أو يقل تركيزها عن تجهيز النباتات بـ CO_2 تحت ظروف الظلام. أن نتائج هذه التجارب أوضحت بأن عملية التركيب الضوئي تتضمن نوعين من التفاعلات هما:

أ- التفاعلات الكيموضوئية (تفاعلات الضوء) Photochemical reaction :

وتتميز بأنها تتطلب وجود الضوء، سريعة، غير حساسة لدرجة الحرارة، تحدث في البذيرات والصفائح ما بين البذيرات ويتم خلالها انشطار الماء ضوئياً.

ب - التفاعلات الكيموحرارية (تفاعلات الظلام) Thermochemical reaction:

وتتميز بأنها لا تحتاج الى تواجد الضوء، بطيئة، ارتفاع درجة الحرارة يؤدي الى إسراعها، تحدث في الحشوة ويتم خلالها اخترا ل CO_2 .



أولا: التفاعلات الكيموضوئية Photochemical reaction :

تستطيع هذه التفاعلات أن تبدأ من الضوء الضعيف وتزداد بزيادته الى حد معين حيث يتشبع جزئي الكلوروفيل بكل ما في استطاعته امتصاصه من الضوء وعند ذلك تنشط حركة الالكترونات الموجودة في الكلوروفيل، وعندما تميل هذه الصبغات للعودة الى حالتها الأصلية غير المتهيجة تخرج منها الطاقة الزائدة وينتقل جزء منها الى حوامل الالكترونات ويخزن الزائد منها بشكل مركبات ATP الغنية بالطاقة بعد أن تتحد مركبات ADP مع حامض الفسفوريك، وتسمى عملية دخول الفسفور برابطة غنية بالطاقة وبالطريقة السابقة الذكر فسفرة ولان هذه التفاعلات تحدث تحت تأثير الضوء فتسمى فسفرة ضوئية. ان أول من ذكر الفسفرة الضوئية Photophosphorylation هو الباحث Arnon عام ١٩٥٤ حيث بين من خلال تجاربه مقدرة البلاستيدات الخضراء المعزولة من النبات والمعرضة للضوء على تكوين مركبات ال ATP الغنية بالطاقة، وبهذا اثبت بأن المايتوكوندريا ليست هي الجزء الوحيد في الخلية الذي ينتج الطاقة. لقد وجد من التجارب بأن البلاستيدات الخضراء تستطيع أن تقوم بتفاعلين كيموضوئيين هما الفسفرة الضوئية

الدائرية و الفسفرة الضوئية غير الدائرية وكما يلي :

الفسفرة الضوئية الدائرية : Cyclic photophosphorylation

يحدث هذا النوع من الفسفرة في البكتريا التي تمتلك القدرة على تصنيع الغذاء بوجود الضوء، وفي هذا النوع من الفسفرة لا ينتج غاز الاوكسجين كما أن تكوين ATP لا يصاحبه أي تغير في مستلم الالكترونات أو مسلمها وان الالكترونات المنبعثة من الكلوروفيل قد ترجع إليه وحسب المعادلة التالية:

كلوروفيل

$$nADP + nH_3PO_4 \longrightarrow nATP + nH_2O$$

ضوء

ب - الفسفرة الضوئية غير الدائرية: No-cyclic photophosphorylation

يحدث هذا النوع من الtsفرة في النباتات الراقية ويحدث خلاله انتاج غاز الأوكسجين ضمن النواتج النهائية. كما أن تكوين ATP يكون مرتبط بنقل الالكترونات من الماء الى المستلم النهائي للإلكترونات $NADP^+$ ومن خلال عدة مركبات ناقلة للإلكترونات وكما موضح أدناه:

انتقال الألكترونات ضوء

$$2H_2O+2NADP^{+}+3ADP+3H_3PO_4 \longrightarrow O_2+ 3H_2O+2\ NADPH+2H+3ATP$$

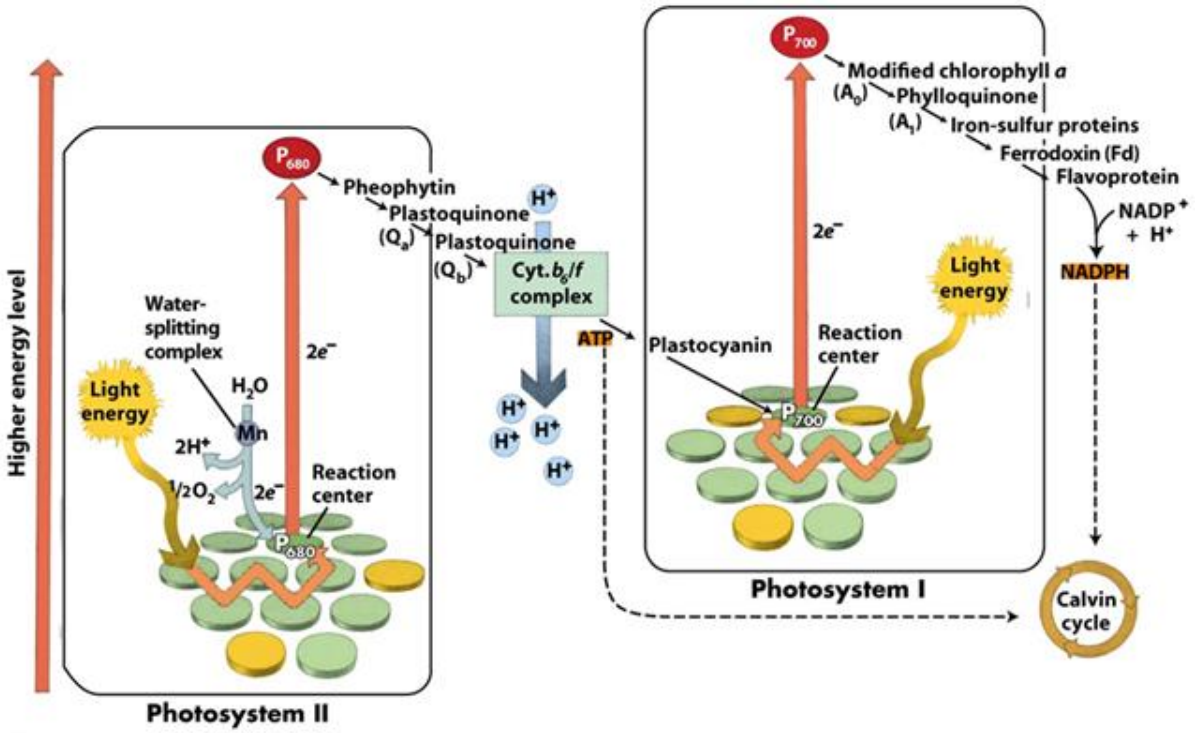
كلوروفيل

طبيعة الفسفرة الضوئية غير الدائرية :

لقد توصل الباحث اميرسن Emerson الى أن كفاءة التركيب الضوئي تكون ضعيفة عند الموجات الضوئية الطويلة (الضوء الأحمر بطول 683-700 مليمايكرون) في حين استعمال النبات للموجات الضوئية القصيرة بطول 673-680 مليمايكرون مع الموجات الضوئية الطويلة في نفس الوقت أدى الى زيادة معدل عملية التركيب الضوئي. عرفت هذه الظاهرة بتأثير امير Emerson effect وأوضحت بأنه يوجد نوعين من التفاعلات الضوئية المتناغمة مع بعضها في عملية التركيب الضوئي وكما يلي:

النظام الضوئي الأول photosystem 1 : يتعلق بالصبغات الممتصة للضوء ذو الموجات الطويلة (683 مليمايكرون) فأكثر، هذه الصبغات تشمل نوع خاص من كلوروفيل (a) يسمى Pigment 700 ويرمز له P700 (وهو يستطيع امتصاص الضوء ذو طول الموجة 700 مليمايكرون) والكاروتينات الفعالة.

النظام الضوئي الثاني Photosystem 2 : يتعلق بالصبغات الممتصة للضوء ذو الموجات القصيرة (173-180) مليمايكرون والتي تشمل الشكل الآخر من كلوروفيل (a) وبقية كلوروفيل (b). فبعد امتصاص الطاقة الضوئية وتركزها في مجموعتين مختلفتين من كلوروفيل (a) داخل صفائح الكرانا أو البذيرات يحدث التالي:



الفسفرة الضوئية و انتقال الالكترونات من ph.II الى ph.I ثم الى $NADP^+$ (تأثير اميرسن)

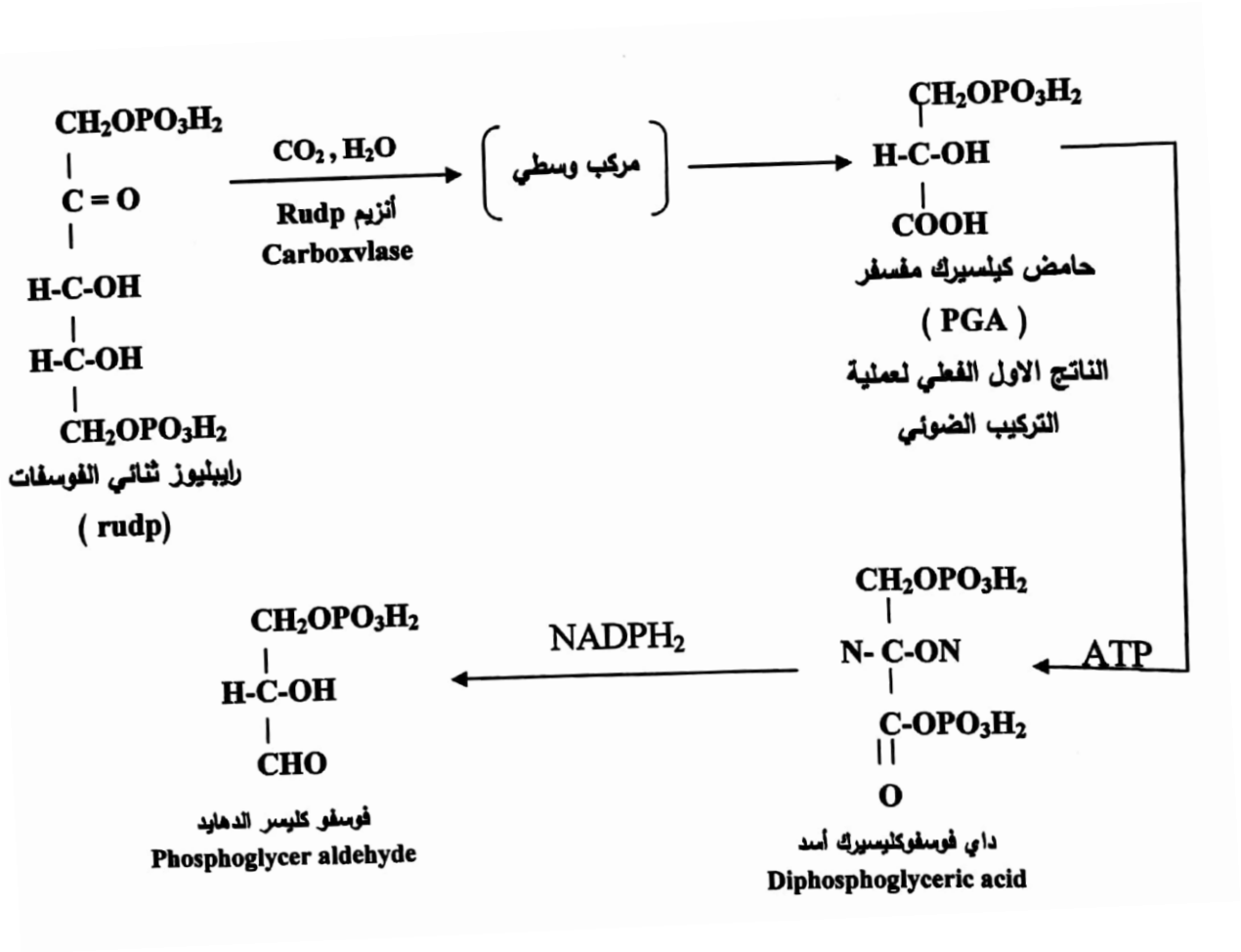
تنطلق الالكترونات من جزيئات كلوروفيل a (P700)الموجود في النظام الضوئي الأول نتيجة امتصاصها للطاقة الضوئية واثارتها الى جزيئات الفيرودكسين Ferrodoxin تاركة جزيئات الكلوروفيل متأينة بشحنة موجبة ومن ثم تقوم جزيئات كلوروفيل (a) العادية الموجودة في النظام الضوئي الثاني بامتصاص الموجات الضوئية المختلفة وتتأين بشحنة موجبة نتيجة انطلاق الالكترونات منها وتركز الطاقة الممتصة فيها ثم تنتقل هذه الالكترونات عبر الحوامل حتى تستلم من قبل جزيئات الكلوروفيل المتأينة في مركز التفاعل الأول. وهكذا فان جزئيات الكلوروفيل في كل من المركزين تمر بسلسلة متعاقبة من التأين والتعادل حيث تتعادل جزيئات الكلوروفيل المتأينة بشحنة موجبة في مركز التفاعل الأول بالالكترونات المنطلقة من مركز التفاعل الثاني بينما تتعادل جزيئات الكلوروفيل المتأينة في مركز التفاعل الثاني بواسطة الالكترونات الناتجة من تحلل الماء. اثناء انتقال الإلكترون خلال هذه الحوامل يحصل فقد في الطاقة التي يحتويها الإلكترون وتتحول هذه الطاقة إلى طاقة كيمياوية بشكل ATP , وفي المرحلة الاخيرة ينتقل الإلكترون من الفيرودكسين الى مركب (NADP+) Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate) الذي يتحد مع ايون الهيدروجين مكوناً (NADPH) .

$$NADP+H^+ + e^- \rightleftharpoons NADPH$$

النتيجة النهائية لتفاعلات الضوء هو تصنيع الطاقة البنائية ATP في عملية الفسفرة الضوئية وانتاج المركب الاختزالي NADPH .

ثانياً: التفاعلات الكيموحرارية (تفاعلات الظلام) Thermochemical reaction :

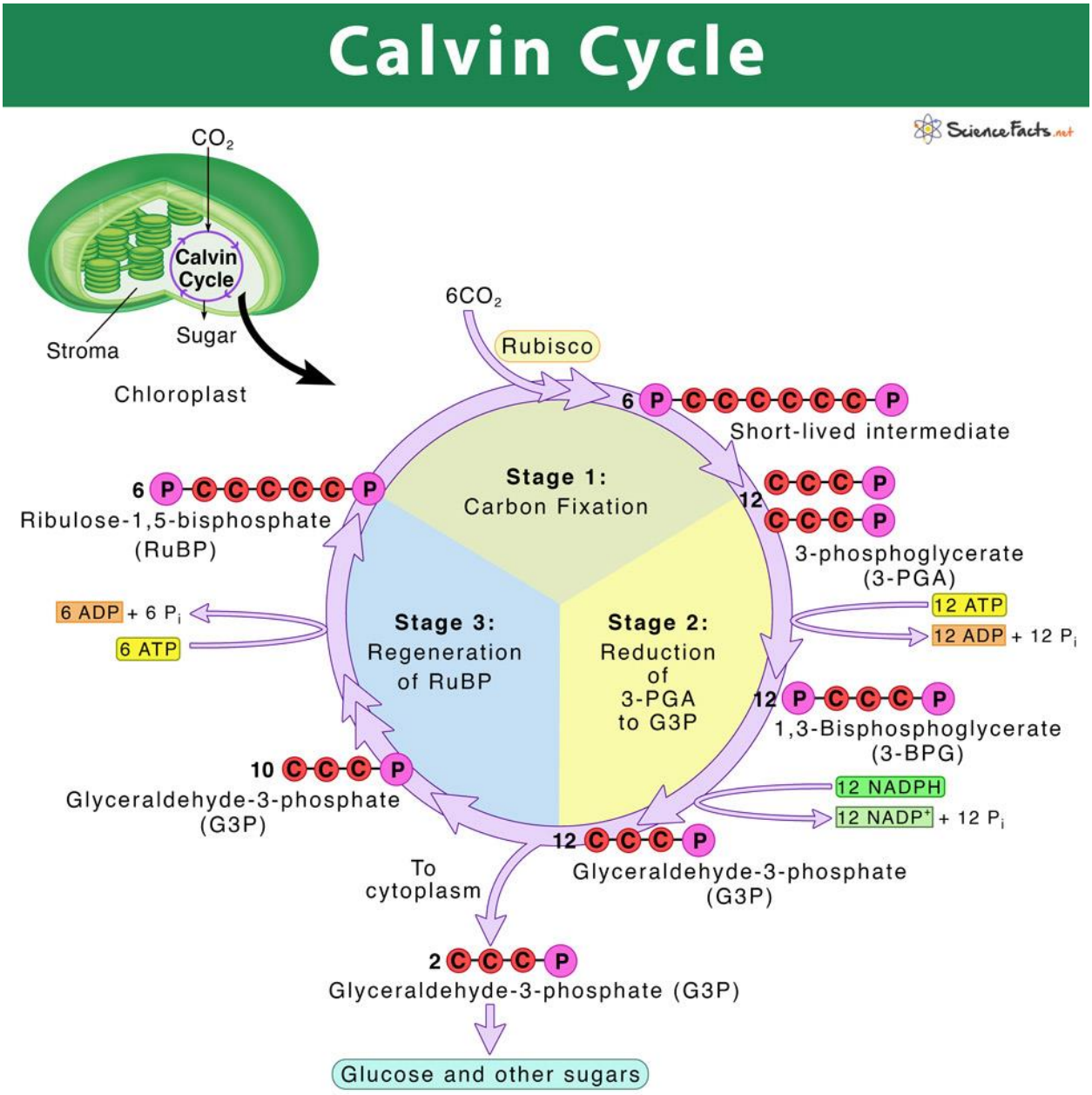
تسمى أيضا بتفاعلات تثبيت واختزال CO_2 , اذ تبين من خلال التجارب بان CO_2 يتحد مع مركب خماسي ذرات الكاربون يعرف برايبيلوز ثاني الفوسفات ribulose 1,5-diphosphate (RuDP) ويرمز له rudp وذلك بمساعدة انزيم ribulose diphosphate (RuDP) carboxylase ويرمز له RuDPCase ليكون مركباً وسطي غير مستقر سرعان ما يتحول الى جزيئتين من حامض الكليسريك المفسفر Phosphoglyceric acid والذي يرمز له (PGA) وهو يمثل الناتج الأول الفعلي لعملية التركيب الضوئي. بعد ذلك يمر (PGA) بمرحلتين تفاعليتين تختزل فيها مجموعة الكاربوكسيل COOH إلى مجموعة الديهايد CHO وهذه العملية الاختزالية تتطلب وجود طاقة وقوة اختزالية وهذا ماقد تم تجهيزه خلال تفاعلات الضوء، فالطاقة تأتي من ATP والقوة الاختزالية من $NADPH^2$.



المسار الابتدائى التفاعلات الظلام في نباتات C3

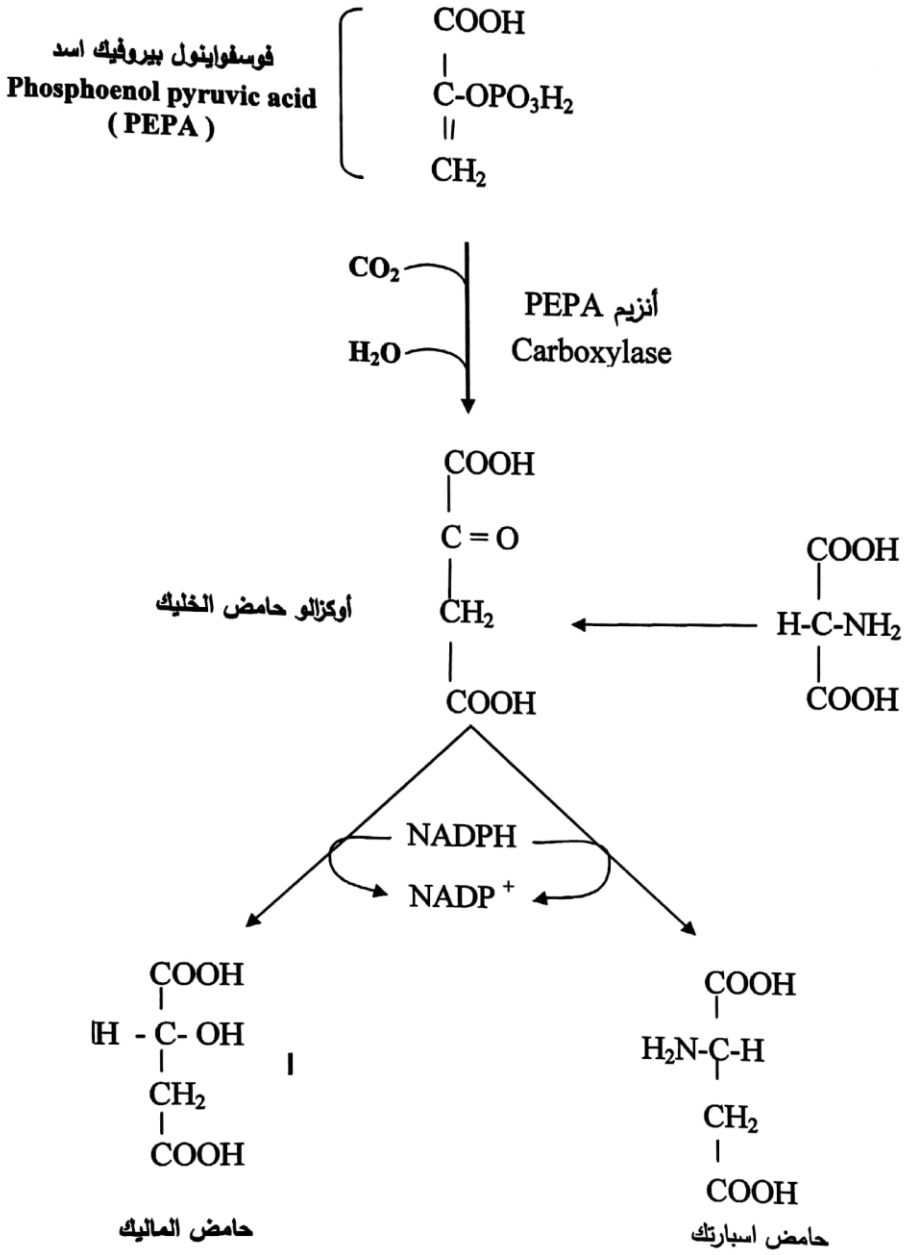
ولا نتاج جزيئة واحدة من سكر سداسي الكاربون يحدث اتحاد جزيئتين من الكليسرالديهايد المفسفر لتتكون جزيئة واحدة من سكر سداسي الكاربون المفسفر والتي تمر فيها بعد بمرحلة انفصال مجموعة الفوسفات عنها لتكون جزيئة سكر سداسية الكاربون حرة وهكذا وبعد ذلك تتحول هذه الجزيئة الى خماسية أو سداسية أو سباعية لتعود بعدها لتكون (rudp) مرة ثانية، والذي يتميز بتواجده بصورة مستمرة وبتراكيز عالية ولفترات طويلة في الخلية النباتية. في حين (PGA) لا يتواجد بتراكيز عالية ولفترات طويلة وسرعان ما يتحول الى مركبات أخرى كالسكريات السداسية الكاربون مثل سكر العنب (glucose) وسكر الفاكهة (fructose) والتي يمكن أن تتواجد بتراكيز عالية في الخلية النباتية ولفترات طويلة. الباحثان كالفن وبنسن Calvin and Bensen اكتشفا بان التفاعلات الكيموحرارية السابقة الذكر والتي تجري خلال الظلام لتثبيت CO_2 تحدث بشكل دائري و اطلقا عليها اسم دورة كالفن Calvin cycle (الشكل ادناه) .

شكل (٥) : دورة كالفن لتثبيت و اختزال CO_2 في نباتات C_3



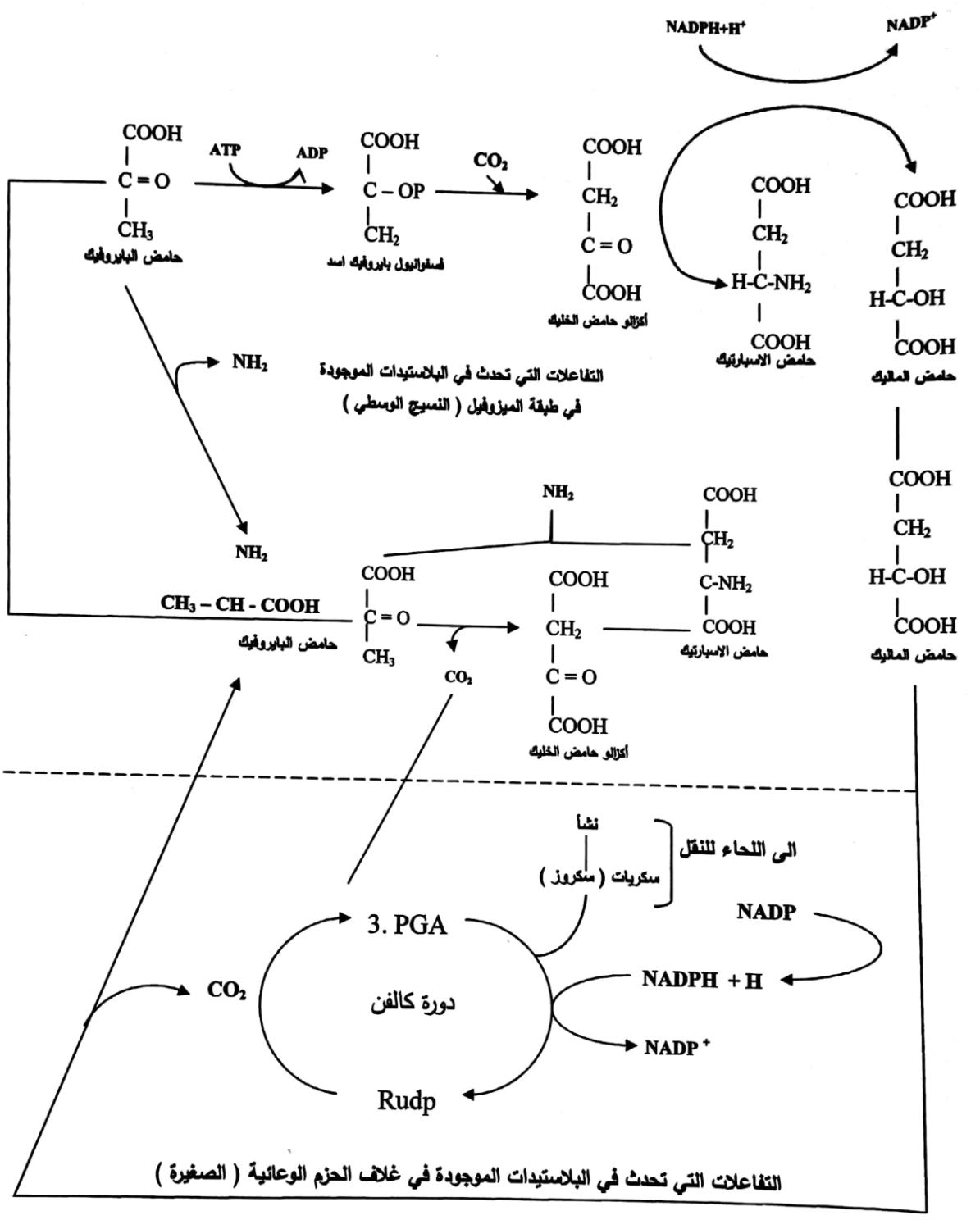
لكن من خلال التجارب اللاحقة تبين بأن دورة كالفن ليس هي المسار الوحيد لتثبيت CO_2 في النبات ، فقد توصل الباحثان هاج وسلاك Hatch and Slack الى دورة جديدة لتثبيت CO_2 في النبات عرفت بمسار هاج - سلاك Hatch Slack pathway حيث يتم خلالها تثبيت CO_2 مع مركب ثلاثي ذرات الكاربون هو فوسفواينول حامض البايروفيك phosphoenol Pyruvic acid والذي يرمز له (PEPA) بمساعدة انزيم phosphoenol pyrurvate carboxylase ويرمز له (PEPA carboxylase) مؤدياً إلى تكوين مركب رباعي ذرات الكاربون هو اكزالو حامض الخليك Oxaloacetic acid والذي

يمثل الناتج الأولي العملية التركيب الضوئي لهذه النباتات, علماً بان الاخير يعاني من عدم الثبات والاستقرار ويتحول الى حامض الماليك Malic acid وحامض الاسبارتيك Aspartic acid .

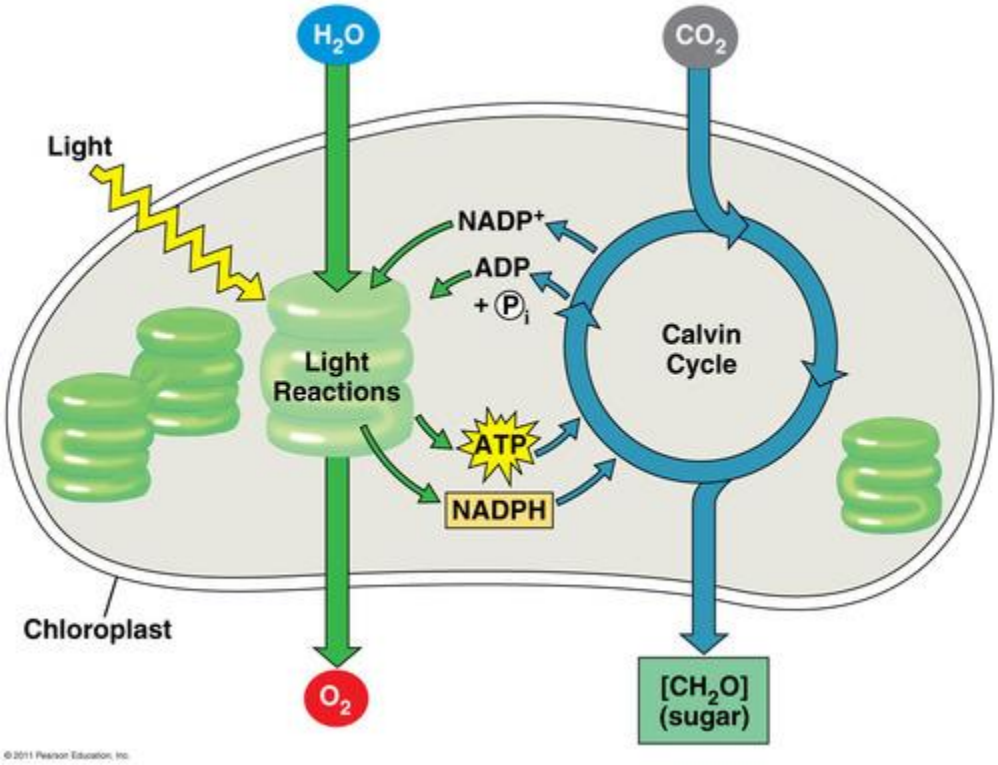


المسار الابتدائي لتفاعلات الظلام في نباتات C4

بعد تكون حامض الماليك والاسباراتيك يمران بسلسلة من التفاعلات بضمنها تلك الخاصة بدورة كالفن لتنتهي التفاعلات بتكوين سكر سداسي الكاربون.


NADPH+H+
NADP+
COOH
C = O
CH3
حامض البايروفيك
ATP
ADP
COOH
C – OP
CH2
فسفوانيول بايروفيك اسد
CO2
COOH
CH2
C = O
COOH
أكزالو حامض الخليك
COOH
CH2
H-C-NH2
COOH
حامض الاسبارتيك
COOH
CH2
H-C-OH
COOH
حامض المالك
NH2
التفاعلات التي تحدث في البلاستيدات الموجودة
في طبقة الميزوفيل (النسيج الوسطي)
NH2
NH2
COOH
CH2
C-NH2
COOH
حامض الاسبارتيك
CH3 – CH - COOH
حامض البايروفيك
COOH
C = O
CH3
CO2
COOH
CH2
C = O
COOH
أكزالو حامض الخليك
COOH
CH2
H-C-OH
COOH
حامض المالك
نشأ
سكريات (سكروز)
الى اللحاء للنقل
NADP
3. PGA
CO2
دورة كالفن
NADPH + H
NADP +
Rudp
التفاعلات التي تحدث في البلاستيدات الموجودة في غلاف الحزم الوعائية (الصغيرة)

لقد تبين من الدراسات الاضافية بان نباتات C3 تستطيع تثبيت ثاني اوكسيد الكربون من خلال دورة كالفن - بنسن فقط التي تحدث في جميع خلايا نباتات C3 المحتوية على البلاستيدات الخضراء في حين تقوم نباتات C4 بتثبيت ثاني اوكسيد الكربون من خلال تداخل دورة كالفن - بنسن مع مسار هاج – سلاك, اذ تحدث دورة كالفن - بنسن في خلايا غلاف الحزم الوعائية الورقية Bundle sheath للنباتات في حين يحدث مسار هاج - سلاك في خلايا ميزوفيل الورقة (خلايا النسيج العمادي و النسيج الاسفنجي) . لقد وجد من الدراسات بان نباتات C4 تختلف تشريحياً عن نباتات C3,اذ تحتوي نباتات C4 على نوعين من البلاستيدات, تتواجد الأولى في خلايا نسيج ميزوفيل الورقة (خلايا النسيج العمادي و النسيج الاسفنجي) والثانية تتواجد في خلايا غلاف الحزم الوعائية الورقية في حين تحتوي خلايا نباتات و C3على نوع واحد من البلاستيدات هي بلاستيدات خلايا الميزوفيل (خلايا النسيج العمادي و النسيج الاسفنجي). ان هذا التنظيم في تقسيم العمل لنباتات C4 دفع علماء فسلجة النبات الى اعتبار نباتات C4 أكثر تطورا من نباتات و C3 لان هذا التقسيم يزيد من كفاءة عملية التركيب الضوئي.



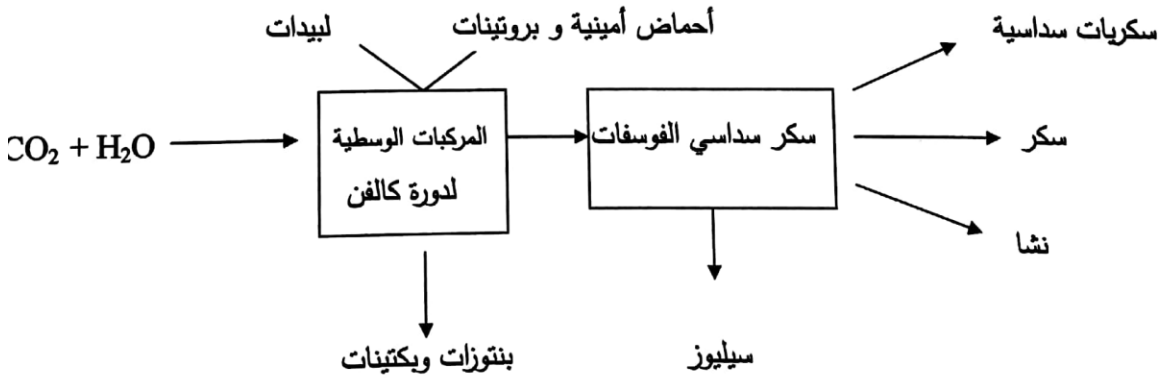
الد
١- تحتاج الى وجود الضـ
٢- سريعة.
٣- غير حساسة للحرارة
٤- تحدث في البذيرات و
٥- النواتج هي ATP و
٦- يحدث خلالها التفاع ضوئيا .
٧- نواتج تفاعلات الضو
٨- تنـتج طاقـة بشـكل . $NADPH_2$
٩- تحدث خلالها عملية
١٠- تفاعلات كيموضو

ت	الفسفرة التأكسدية	ت	الفسفرة الضوئية
١	تحدث خلال عملية التنفس في المايتوكوندريا.	١	تحدث خلال عملية التركيب الضوئي في صفائح الكرانا الموجودة في البلاستيدة الخضراء.
٢	تحدث ليلا ونهارا .	٢	تحدث في النهار فقط .
٣	مصدر الالكترونات هو المواد المختزلة ويتكون فيها الماء.	٣	مصدر الالكترونات هو الماء ولذا تستهلك الماء .

الفرق بين دورة كالفن ومسار هاج – سلاك لتثبيت CO_2

دورة كالفن	مسار هاج – سلاك
١- CO_2 يتحد مع السكر خماسي ذرات الكربون هو رايبيلوز داي فوسفات RUDP .	١- CO2 يتحد مع مركب ثلاثي ذرات الكربون هو فوسفوينول حامض البيروفيك يرمز له PEPA
٢- يتم التفاعل بوجود انزيم Rudp Carboxylas	٢- يتم بوجود PEPA Carboxylas .
٣- الناتج الاول لعملية التركيب الضوئي مركب ثلاثي ذرات الكربون هو فوسفو جلسرك اسد ويرمز له PGA .	٣- الناتج الاول لعملية التركيب الضوئي مركب رباعي ذرات الكربون هو اوكزالو حامض الخليك .
٤- تحدث في نباتات C3 و C4 .	٤- تحدث في نباتات C4 فقط .
٥- تحدث في معظم النباتات .	٥- تحدث في عدد قليل من النباتات .
٦- تحدث في خلايا الميزوفيل لنباتات C3 و في خلايا الحزم الوعائية لنباتات C4	٦- تحدث في خلايا الميزوفيل لنباتات C4

مع ان البناء الضوئي يصور على انه يؤدي الى تكوين السكريات السداسية لكنه قد يؤدي ايضا الى تراكم الكثير من المواد الاخرى وبصورة غير مباشرة مثل النشا و البروتينات و الدهون و كما موضح في المخطط التالي :



مقارنة بين التنفس والتركيب الضوئي

ت	التنفس	التركيب الضوئي
١	يستهلك O_2	يتحرر O_2
٢	يتحرر CO_2	يستهلك CO_2
٣	تحدث العملية ليلا ونهاراً	تحدث العملية بوجود الضوء فقط
٤	الضوء غير ضروري للعملية	الضوء ضروري للعملية
٥	أثناء التنفس تتحول الطاقة الكيمياوية الكامنة إلى طاقة حركية	أثناء التركيب الضوئي تتحول الطاقة الضوئية إلى طاقة كيمياوية كامنة
٦	المواد الأولية للتفاعل هي الكلوكوز والأوكسجين	المواد الأولية للتفاعل هي CO_2 والماء
٧	الكلوروفيل غير ضروري	الكلوروفيل ضروري
٨	يحدث في السايتوبلازم والمايتوكوندريا	يحدث في الكلورويلاست (البلاستيدات الخضراء)
٩	تحرر طاقة	تمتص طاقة
١٠	تسبب قلة وزن النبات	تسبب زيادة وزن النبات
١١	عملية هدمية	عملية بنائية
١٢	تحدث فيها عملية نزع CO_2 decarboxylation	تحدث فيها عملية إضافة CO_2 (carboxylation)
١٣	يخرج منها الماء	تتطلب الماء
١٤	أثناء هدم مول واحد من الكلوكوز يتحرر ٣٨ مول ATP	أثناء تكون مول واحد من الكلوكوز تتطلب ١٨ مول ATP