

الفصل الأول

مقدمة عن الكيمياء الضوئية

مقدمة

الكيمياء الضوئية هي فرع من فروع علم الكيمياء، ويشمل دراسة التفاعلات بين كلا من الذرة، والجزيئات الصغيرة والضوء (أو الإشعاع الكهرومغناطيسي). ومثله كمثل كل الفروع العلمية، فإن الكيمياء الضوئية تستخدم النظام الدولي SI أو نظام القياس المتري. الوحدات المهمة والثابت التي يتم استخدامها بكثرة تتضمن الأمتار (وأشكاله المختلفة، مثل: السننيمتر، والميليمتر، والميكرومتر، والنانومتر، وهكذا..) والثواني، والهرتز، والجول، والمول، وثابت الغاز R وثابت بولتزمان. وهذه الثوابت ووحداتها متكاملة أيضا مع مجال الكيمياء الطبيعية.

وتعد الطرق الضوئية احدى أبسط وأهم الطرق التي يمكن بواسطتها توليد ذرة أو شق حر جراء تعريض جزئية معينة لإشعاع ذو طول موجي معين. فإذا كان للجزئية قابلية لامتصاص طاقة الضوء فأنها سوف تثار من حالة الخمود في مستواها الطاقى الأساس وتنتقل إلى الحالة المثارة في مستوى طاقي أعلى. وعند ذلك، سوف تعاني تفككا معينا إلى ذرات أو شقوق حرة. وحيث أن عدد الشقوق الحرة المتكونة في زمن معين يعتمد على شدة الضوء الممتص، فيكون عندئذ من السهل جداً السيطرة على الظروف اللازمة للتفاعل الضوئي.

وبهذا يمكن استخدام الطرق المختلفة الملائمة في التفاعلات الكيميائية الضوئية لتتبع حركية تفاعل الشقوق الحرة أو الذرات في الدرجات الحرارية الاعتيادية أو المنخفضة، والتي هي بالحقيقة تتطلب درجات حرارية عالية في حالة استخدام الطرق الحرارية غير الضوئية.

الأشعة وأنواعها

لعل أسهل طريقة لإنتاج الشقوق الحرة أو الذرات تكون عن طريق تعريض المادة الكيميائية لأشعة معينة.

ويمكن تصنيف الأشعة، بصورة عامة، إلى صنفين رئيسيين، وهما:

1- الأشعة الكهرومغناطيسية

وتشمل فوتونات الضوء في المناطق البنفسجية والمرئية وتحت الحمراء من الطيف وكذلك أشعة أكس وأشعة γ .

2- الأشعة الدقائقية

وتشمل حزم الالكترونات والبروتونات مثل أشعة α و β وغيرها. أما العمليات التي تحدث بموجبها التفاعلات الكيماوية فيمكن أيضاً تصنيفها الى صنفين رئيسيين وذلك حسب نوع الاشعة التي تتعرض لها، وعلى النحو الآتي:

أ- العمليات الإشعاعية

وهذه العمليات تحدث نتيجة تعرض وسط التفاعل إلى الأشعة الدقائقية وقسم من الأشعة الكهرومغناطيسية ذات الطاقة العالية، مثل: أشعة أكس. وينتج خلال هذه العملية الأيونات فضلاً عن الذرات الحرة.

ب- العمليات الضوئية

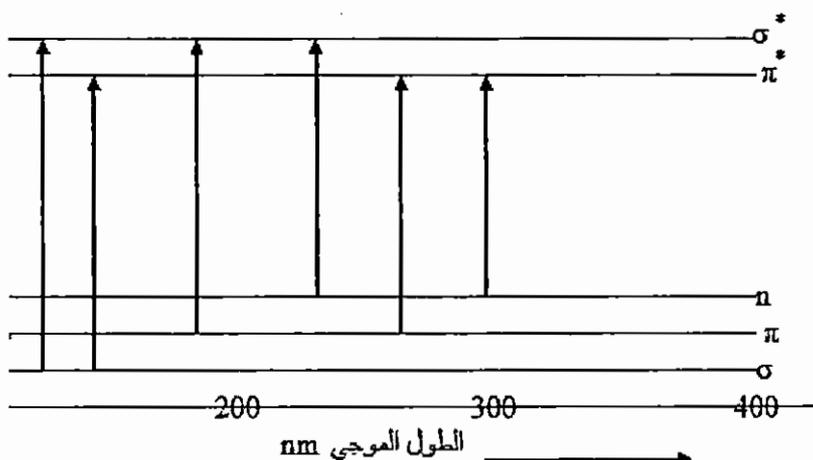
وتحدث هذه العمليات نتيجة تعرض وسط التفاعل إلى فوتونات الضوء ذات الطاقة الكهرومغناطيسية المنخفضة، مثل: الأشعة فوق البنفسجية والمرئية وتحت الحمراء.

وبسبب الطاقة المنخفضة لهذا النوع من الأشعة فلا يمكن إنتاج الأيونات، وبالتالي تقتصر التفاعلات على الشقوق الحرة والذرات فقط.

امتصاص الضوء والحالات المثارة إلكترونياً

عندما يمر شعاع كهرومغناطيسي (فوتون) خلال خلية تحتوي على جزيئات فإن إتحاد يحصل بين عزم القطبين المرتبط بانجزئية وبين المجال الكهربائي المرتبط

بالشعاع الكهرومغناطيسي وتنتقل الطاقة من الفوتون الى الجزيئية فيؤدي ذلك الى تغير في التركيب الالكتروني للجزيئية وهذا يؤدي الى تعبير بدلالة الاصطلاحات للمدارات الجزيئية هو في الحقيقة تغير في شكل ماتحتويه مجموعة من المدارات ويحدث في المستويات المثارة كما يحدث في المستويات المنخفضة. وهناك أنواع مختلفة من الانتقالات الالكترونية ويظهر الطول الموجي الذي تحدث عنده هذه الانتقالات والطاقة اللازمة لها.



وتوضح هذه الانتقالات بجدول يوضح بعض طاقات الانتقال النموذجية والاطوال الموجية لمجموعة من الكروموفورات.

تيمية الامتصاص (nm)	طاقة الانتقال (kj.mol)	التسمية (الانتقال)	الكروموفور
150	800	$\sigma^* \leftarrow \sigma$	C-C, C-H
185	650	$\sigma^* \leftarrow n$	-O-
195	600	$\sigma^* \leftarrow n$	-N-
195	600	$\sigma^* \leftarrow n$	-S-
300	400	$\pi^* \leftarrow n$	C=O
190	630	$\sigma^* \leftarrow n$	
190	630	$\pi^* \leftarrow \pi$	C=C

ويطلق مصطلح الكروموفور (Chromophore) لوصف النظام الحاوي على إلكترونات قابلة للإثارة، وتمثل أعلى طاقة للانتقال من أوطاً مدار متأصر σ إلى أعلى مدار مضاد للتأصر σ^* . وتكون ترددات وشدة حزم الامتصاص حساسة تجاه طبيعة المذيب وتجاه عاملي الحث والرنين (الاقتزان) للمجموعة المعوضة. ومن الملائم هنا تعريف بعض المصطلحات التي تتعلق بتردد وشدة الامتصاص، وهي:

- التأثير الهايبركرومي hyperchromic

هو زيادة شدة حزمة الامتصاص

- التأثير الهايبوكرومي hypochromic

وهو نقصان شدة حزمة الامتصاص

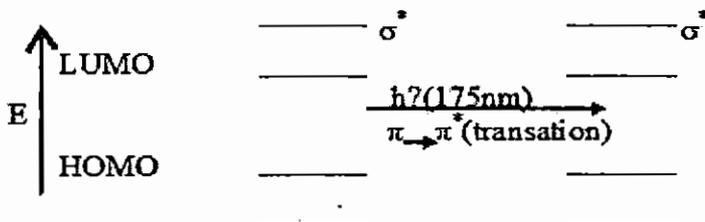
- الانزاحة الحمراء Bathochromic Shift

تمثل انخفاض الانزاحة نحو التردد الأقل (باتجاه الأحمر)

- الانزاحة الزرقاء Hypochromic Shift

وتمثل انزاحة التردد نحو الاعلى (باتجاه الأزرق)

ومن الأمثلة على ذلك الامتصاص هي جزئية الأنيلين فإن امتصاص الشعاع الكهرومغناطيسي يؤدي الى رفع الالكترون من المدار π (المملوء) الى المدار π^* (الفارغ) كما موضح في المخطط التالي:



وكذلك لجزيئ الفورمالدهيد سوف يظهر انتقالات $\pi \rightarrow \pi^*$ ، وكذلك الانتقال $\pi \rightarrow n$ يعني وجود أوامر مزدوجة وكذلك الكترون حر، وأن أهم الانتقالات الشائعة وهي ($\pi \rightarrow \pi^*$ ، $\pi \rightarrow n$ ، $n \rightarrow \sigma^*$) ومعقدات الشحنة المنتقلة (Charge transfer complexes).

تبديد الطاقة ومخطط مستويات الطاقة

تعتبر الحالة المستقرة لمعظم المركبات العضوية هي الحالة الاحادية وتمثل ب S_0 وعندما تمتص الجزيئية فوتوناً من الضوء فان احد الالكتروين في اعلى المدار مشغول HOMO يرتفع الى المدار ذي الطاقة الاعلى S_1 وتسمى هذه العملية بالامتصاص ويمكن لهذا الالكترون ان يرتفع الى احدى المستويات S_2, S_3, S_4 وهناك حالة احادية (S_1, S_2, S_3, \dots) حالة ثلاثية تقابلها (T_1, T_2, T_3, \dots) إلا أن طاقة الثلاثية تكون دائماً أقل كما، وضحنا سابقا.

وأن الجزيئية لكي تعود إلى حالة السكون، ويمكن للجزيئية المثارة:

- أن تبعث كماً من الطاقة عند نفس التردد أو عند تردد مختلف، وهذا الانبعاث يدعى بالفلورة أو الفسفرة.

- أن تصطدم مع الجزيئات الأخرى، حيث تعطي بعض أو كل طاقة الإثارة. وهذه الطاقة أما أن تسبب تفاعلاً للجزيئات الأخرى أو أن تتسرب بشكل حرارة.

- يمكن أن تصطدم مع الجزيئات الأخرى وتتفاعل معها.

- يمكن أن يتفكك تلقائياً إذا بلغت طاقة الإثارة حد طاقة التفكك للأصرة .

- أن ثوابت سرعة هذه العمليات هي جميعاً من المرتبة الأولى، وتعطي أزمنة بقاء هذه العمليات بالقيم التالية:

العملية	ثابت السرعة (ثا ⁻¹)
التحول الداخلي	$10^{-4} - 10^{-12}$
الفلورة	$10^{-6} - 10^{-9}$
العبور البيني ($S_1 \rightarrow T_1$)	$10^{-4} - 10^{-12}$
الفسفرة	$10^{-2} - 10^{-4}$
العبور البيني	$10^{-4} - 10^{-12}$

التفاعلات الكيميائية تحدث فقط عندما يكتسب الجزيء "طاقة التنشيط" اللازمة. وهناك مثال بسيط لاحتراق البنزين (الهيدروكربون) إلى ثاني أكسيد الكربون والماء. ففي هذا التفاعل، يتم توفير طاقة التنشيط في شكل حرارة أو شرارة. أما في حالة التفاعلات الضوئية فإن الضوء يوفر طاقة التنشيط. وهكذا، فإن الضوء هو آلية توفير الطاقة اللازمة لتفعيل العديد من التفاعلات. وفي حالة استخدام ضوء الليزر، فمن الممكن أن تثير انتقائياً الجزيء وذلك لإنتاج الحالة الإلكترونية أو التذبذبية المطلوبة.

التفاعلات الضووكيميائية جزء من عمليات طبيعية كثيرة. ففي التمثيل الضوئي، على سبيل المثال، تمتص النباتات الخضراء ضوء الشمس، ثم تستخدم هذه الطاقة الضوئية لإنتاج الغذاء، من ثاني أكسيد الكربون من الهواء، ومن ماء التربة. وهكذا يحول النبات الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية للغذاء. ومن خلال عمليات جيولوجية، تتحول النباتات إلى فحم حجري أو نפט. وعند احتراق هذا الوقود، تنطلق طاقة الضوء التي أُخترنت في النباتات منذ ملايين السنين.

تشمل العمليات الصناعية الكثيرة أيضاً تغيرات ضووكيميائية. ففي التصوير الضوئي، على سبيل المثال، تمتص بعض أملاح الفضة في فيلم التصوير الضوء

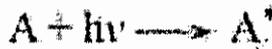
عند التقاط الصورة. ويغيّر الضوء الممتصّ هذه الأملاح كيميائياً. وعندما يُحمّض الفيلم تُصدر الأملاح المتغيرة صوراً مظلمة على السالب.

ويتضمن البحث في الكيمياء الضوئية هذه الأيام تطوير الاستخدامات التقنية للطاقة الشمسية. ويسعى بعض علماء الكيمياء الضوئية إلى إيجاد طرق لتقليد عملية التمثيل الضوئي بذرات مُخلّقة اصطناعياً. ويأمل هؤلاء الكيميائيون في تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء بطريقة أكثر كفاءة مما هو ممكن الآن. ويدرس كيميائيون آخرون سبلاً لاستخدام ضوء الشمس في إنتاج أنواع من الوقود، مثل غاز الهيدروجين والميثانول.

الإعدادات التجريبية

لكي تبدأ العملية الكيمياء الضوئية يلزم أن تمتصّ الذرة أو الجزيء طاقة ضوئية أو "كمّاً quantum" من الطاقة هو الفوتون. وعندها تزداد طاقة هذه الذرة أو الجزيء وتصبح أعلى من مستواها الطبيعي، أو تصبح في حالة مهيجة (أو منشّطة). وعندما يُمتص «كم» ضوء مرئي أو أشعة فوق بنفسجية يرتفع إلكترون موجود في سوية طاقة منخفضة نسبياً في الذرة أو الجزيء إلى سوية طاقة أعلى. أما إذا امتصّ كم من أشعة تحت الحمراء فتتأثر عندها حركات الذرات في الجزيء.

وبعد الامتصاص المبدئي للأشعة، تحدث للجزيء المهيج عدداً من العمليات الكيميائية الضوئية الأولية. والعملية الأولية تدل على التحول الذي يحدث مباشرة عندما يُمتصّ فوتون ضوئي واحد في جزيء واحد. وتجرى عملية ثانوية (أو عمليات ثانوية عدة) بعد الخطوة الأولية. فإذا رُمز للجزيء بالرمز A وحدث امتصاص الفوتون الضوئي $h\nu$ ، أمكن كتابة ذلك على النحو الآتي:



وتدل A^* على الجزيء المهيج بعد امتصاصه الفوتون المناسب طاقياً.

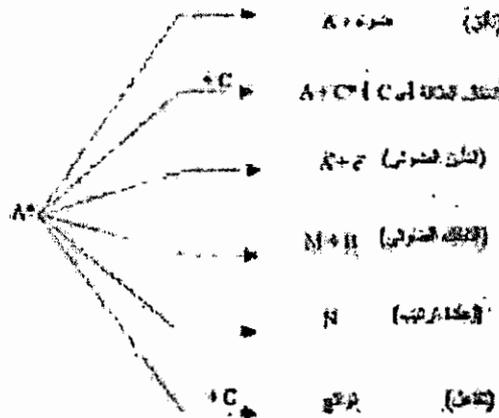
الإثارة

يمتص الضوء في شكل كمات صغيرة من الطاقة المشعة فوتونات. وتعتمد طاقة الفوتون على طول موجة الضوء، وبعد امتصاص أحد الفوتونات، تزداد طاقة الجزيء ويكون في حالة إثارة. في معظم الحالات، يبقى الجزيء على هذه الحالة فقط واحدًا على مليون من الثانية أو أقل. وأحيانًا يعود الجزيء مباشرة لحالته العادية يفقد الطاقة المكتسبة في التصادمات مع الذرات الأخرى، أو بإطلاقها على هيئة ضوء. لكن إذا كان الطول الموجي لفوتون الضوء الممتص قصير. كما في الضوء المرئي. فإن الجزيء رُبَّمَا يكون قد تلقى طاقة كافية ليمر بالتفاعلات الكيميائية غير العادية، بينما هو في حالة إثارة.

العمليات الكيميائية الضوئية الأولية

يبين المخطط الآتي مختلف العمليات الأولية التي يمكن أن تطرأ على الجزيء

المهيج: A^*



فالجزيء المنشط (ذو الطاقة العالية) يرجع إلى حالته البدائية حسب إحدى العمليات الفيزيائية الآتية:

(1) يطلق طاقته المهيجة بالتألق. luminescence.

(2) قد ينقل طاقته إلى جزيء آخر، C، يصطدم معه من دون إصدار ضوء.

فيتحول A* المهيج إلى الجزيء الطبيعي A ويتحول C إلى C*

(3) قد يمتص إلكترون e- في عملية امتصاص الضوء الأولي طاقة كبيرة ما

يؤدي إلى انفصاله عن الذرة أو الجزيء، فيتحول A إلى الأيون الموجب A+

وتسمى هذه العملية التأين الضوئي. photoionization.

إن امتصاص الطاقة (طاقة أثارة) يعمل على كسر الروابط الكيميائية أو إعادة

ترتيبها، وهذا يؤدي إلى حدوث تفاعلات كيميائية مثل: التفكك

الضوئي photodissociation، وإعادة ترتيب rearrangement الجزيء،

والتفاعل مع جزيء آخر C. ففي التفكك الضوئي تنكسر A* متحولة إلى شقوق

جزيئية M و B أو ذرات. أما في إعادة الترتيب (أو التماكب الضوئية-

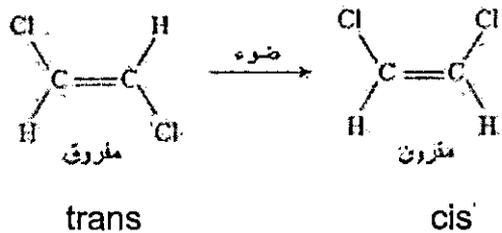
photoisomerization) مثل: تحول البوتان إلى إيزوبوتان، فيتحول A إلى N،

وهو جزيء يتألف من الذرات نفسها المؤلفة لـ A وعددها نفسه، ولكن الترتيب

البنوي للذرات فيهما مختلف.

مثال ذلك: تحول ثنائي كلورو الإثيلين (المفروق-trans) إلى (المماكب المقرون-

cis)



ففي المماكب المفروق تقع ذرتا الكلور باتجاهين متعاكسين بالنسبة للروابط الثنائية، في حين هما تقعان في جهة واحدة من الرابطة الثنائية في المماكب المقرون. وإذا أريدت الدقة تماماً، فإن أمثال التحولات الثلاثة الأخيرة هي التي تُعنى بها الكيمياء الضوئية، إلا أن جميع التأثيرات المذكورة في المخطط تتدرج عادة ضمن الكيمياء الضوئية.

العمليات الكيميائية الضوئية الثانوية

وتجري بعد إتمام الخطوة الأولية، مثال ذلك: تكوّن الأوزون، وتحطّمه في طبقات الستراتوسفير، والتفاعلات المتسلسلة.

الكيمياء الضوئية العضوية

الكيمياء الضوئية العضوية وغير العضوية الفلزية

التألق الضوئي

التألق "luminescence" هو إصدار إشعاع مرئي أو غير مرئي بدرجة الحرارة العادية من أي مادة نتيجة امتصاص طاقة مهيجّة على شكل فوتونات، أو جسيمات مشحونة أو تحوّل كيميائي.

وفي الحقيقة، فإن التألق مصطلح عام يتضمن التفلور fluorescence ، والفسفرة phosphorescence. ففي التفلور يصدر الجزيء أو الذرة إشعاعاً مرئياً بالانتقال من سوية إلكترونية ذات طاقة عالية إلى سوية طاقة أخفض. وتكون المدة الفاصلة بين امتصاص الطاقة وإصدارها صغيرة جداً لا تتجاوز 10^{-8} إلى 10^{-3} ثانية. وبهذا يختلف التفلور عن الفسفرة التي قد يمتد الفاصل الزمني بين الامتصاص والإصدار فيها من 10^{-6} ثا إلى أيام عدة. المواد المتفلورة قد تكون سائلة أو صلبة، عضوية أو لا عضوية. أما في الفسفرة، فتكون المادة المهيجّة بلورية أو سائلة، ويستمر سبب الإصدار بعد إزالة سبب التهيج، وقد تدوم

لفترة أجزاء من الثانية أو لمدة ساعة أو أكثر. وهذه الخاصة تحدث في بعض المركبات العضوية، وتتم أيضاً في العديد من المركبات اللاعضوية الصلبة.

التحليل الضوئي الومضي

يطلق اسم التحليل الضوئي الومضي flash photolysis على طريقة تتبّع لدراسة آلية التفاعلات الكيماوية الضوئية التي يدخل فيها تكون جذور radicals حرة (عضوية أو لاعضوية)، وذلك بتسليط ومضة من ضوء شديد على مزيج التفاعل، فتتشكل جذور حرة تنشط التفاعلات الكيماوية الضوئية. وتُحلّل نواتج التفاعل في الحال بطريقة طيفية، وبذلك يمكن معرفة الجذور الحرة من الطيف. والجذر الحر هو شذفة من جزيء فيها إلكترون حر واحد أو أكثر ويكون عمره قصيراً ويكون شديد الفعالية. ومن المتعارف أن يشار إلى الجذر الحر بوضع نقطة أعلى رمزه من ناحية اليمين، مثل: Cl^{\bullet} ، أو $(C_2H_5)^{\bullet}$. وتتكون الشقوق الحرة بتكسير الرابطة الجزيئية، وتعمل الشقوق الحرة على تكوين مركبات وسطية في عمليات رئيسية، مثل: الأكسدة، والتحليل الضوئي والبلمرة.

وتستعمل هذه الطريقة في التفاعلات السريعة جداً التي تحدث في المتفجرات وفي ألسنة اللهب؛ فإذا أخضعت المنظومة (الجملة) المتفاعلة إلى نبضة ضوئية ذات طاقة عالية لفترة زمنية قصيرة، كما يحدث عادة لدى تفريغ مكثف كهربائي مشحون في أنبوب تفريغ مناسب، فإن الجزيئات كلها في أنبوب التفريغ، تنتفك إلى شقوق حرة. ويمكن الحصول على نبضات ضوئية من مرتبة 50 ميغا واط MW لبضعة ميكرو ثواني، وقد تم تحديد تراكيز مواد مهمة، مثل: $(NH_2)^{\bullet}$ و $(ClO)^{\bullet}$ و $(CH_3)^{\bullet}$ بهذه التقنيات الكيماوية الضوئية.

التصوير الضوئي

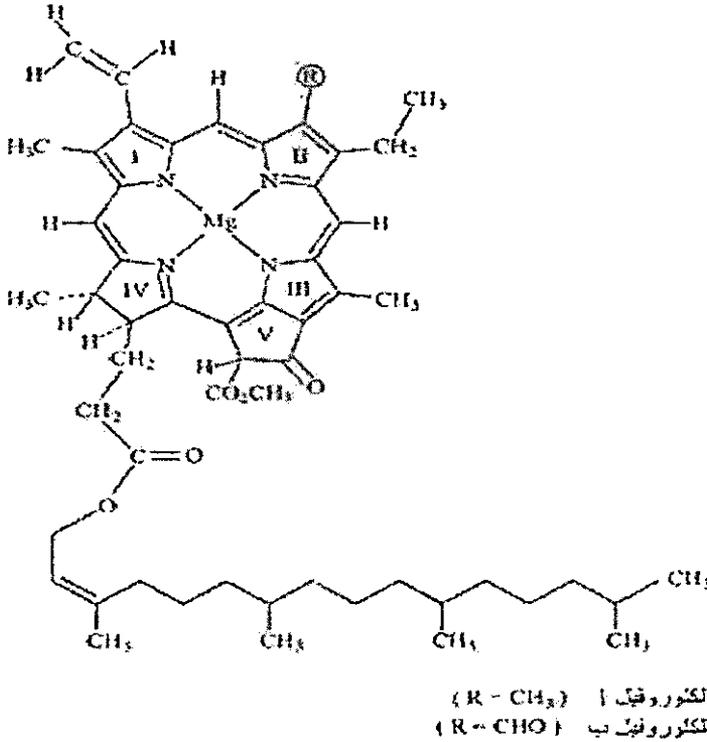
من المعروف أن تعريض ملح مثل كلوريد الفضة إلى ضوء الشمس، يؤدي إلى تغير لونه الأبيض إلى الرمادي تدريجياً، بفعل امتصاص فوتونات الضوء الشمسي، فإذا مزج كلوريد الفضة $AgCl$ أو بروميد الفضة $AgBr$ مع الجيلاتين وعرض المزيج إلى الضوء لفترة قصيرة، لا يلاحظ حدوث شيء ولكن عند وضع هذا المستحلب في محلول مادة مختزلة ضعيفة، مثل: حمض بيروجاليك ($pyrogallic\ acid$) فإن تلك الأجزاء من المستحلب التي عرضت للضوء (ولو لفترة قصيرة) سوف تعود إلى ذرات الفضة المعدنية، أسرع بكثير من الأجزاء التي لم يصلها الضوء. وبذلك يمكن تشكيل صورة لجسم ما تصدر مناطقه مقادير مختلفة من الضوء من نقاطها المختلفة. وتتألف لوحة التصوير (فيلم التصوير) من كميات كبيرة من قسيمات من بلورات هاليدات الفضة (مركبات الفضة مع الهالوجينات وأساساً مع الكلور والبروم). وعندما ترجع كميات الهاليدات كافة إلى الفضة المعدنية، يسود الفيلم تماماً، في حين لا تسود الأماكن من الفيلم التي لم تتعرض إلى إشعاعات الضوء. يمكن إزالة كامل كميات الهاليدات هذه بإذابتها في محلول ثيوكبريتات الصوديوم المعروف تجارياً باسم (الهيبر)، وتكون إزالة الهاليدات متناسبة مع كمية الضوء الواصل إلى سطح لوحة التصوير، ولذلك تتضح بعد إظهار الفيلم مناطق متدرجة في السواد، وذلك من السواد التام إلى الشفافية التامة، وبذلك نحصل على الصورة السلبية للجسم المراد تصويره، وبعملية تصوير تالية يمكن الحصول على الصورة العادية. ويمكن زيادة حساسية فيلم التصوير لكي يصبح قادراً على التعامل مع استطاعات ذات طاقة صغيرة بتصغير أبعاد الهاليدات إلى الدرجة المطلوبة لكي تصبح قادرة على الاستجابة لهذه الإشعاعات الضوئية الضعيفة. تكون هاليدات الفضة حساسة خاصة إلى الإشعاعات ذات طول الموجة في منطقة الضوء المرئي وإلى منطقة الإشعاعات

فوق البنفسجية UV . ولكن إضافة بعض الصبغات إلى مستحلب هذه الهاليدات مثل صباغ ديسانين dicyanin يجعل الفيلم حساساً حتى للأشعة تحت الحمراء، الأمر الذي يجد تطبيقات مهمة جداً إذا عرف أن جميع المواد تصدر إشعاعات تحت حمراء حتى في درجات الحرارة العالية والدنيا.

الاصطناع الضوئي

يعد الاصطناع الضوئي photosynthesis الذي يقوم به الغطاء النباتي على سطح الأرض والذي يؤدي إلى إنتاج الغذاء للكائنات الحية كافة، أكثر التفاعلات الكيميائية الضوئية أهمية.

ويتم هذا الاصطناع باتحاد ثنائي أكسيد الكربون CO₂ مع الماء لإنتاج الغذاء في النبات الأخضر، وذلك بوجود الكلوروفيل اليخضور (chlorophyll) وضوء الشمس. يعطي الكلوروفيل النباتات لونها الأخضر، وهو مركب عضوي معقد يحتوي على ذرات المغنسيوم، وهو موجود في النباتات كافة عدا الفطر fungi ، والبكتريا bacteria وله ثلاثة أشكال (أ وب وج)، وجميعها ضروب بورفيرين por phyrins فيها ذرة مغنسيوم في الوسط. يستقبل الكلوروفيل الأشعة التي تصل أطوالها إلى 700 ميكرون (mμ) ؛ ووظيفته في الاصطناع الضوئي تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كيميائية. وهو من حيث يشبه بنية الهيمين (الصباغ) الذي يمنح الدم لونه الأحمر.

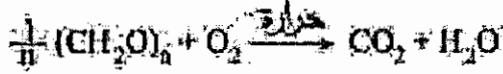


الكلوروفيل (أ) صيغته كما هو مبين في الشكل C₅₅H₇₂MgN₄O₅ (درجة انصهاره 117-
 120) س، والكلوروفيل (ب) صيغته: C₅₅H₇₀MgN₄O₆

يمتص الكلوروفيل الإشعاعات الضوئية الحمراء والزرقاء أساساً، وكذلك يمتص
 الإشعاعات الخضراء ولكن بدرجة أقل. ويؤدي هذا الامتصاص إلى تشكل
 الكلوروفيل المهيج excited chlorophyll، وهو المسؤول عن إنتاج كامل المواد
 اللازمة لبناء العالم النباتي على وجه البسيطة ويرمز لذلك بالتفاعل الآتي:



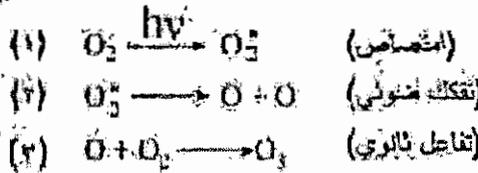
حيث يدل الرمز CH₂O على المركبات الكربوهيدراتية (مائيات الفحم)، والتي
 يمثلها السليولوز، ويتم الحصول على حرارة وفق التفاعل الآتي:



وتنتج من حرق مول واحد (جزء جرامي واحد) من المادة المذكورة كمية حرارة قدرها 112 كيلو سعر. وهذا يعني أن التفاعل الماص للحرارة الموافق لتشكل الكربوهيدرات من الماء وغاز CO_2 يحتاج إلى امتصاص طاقة تساوي 112 كيلو سعر/مول، وهي الطاقة التي يوفرها امتصاص فوتونات الإشعاع الشمسي. توافق هذه الطاقة إشعاعاً ضوئياً طول موجته مساوٍ أو أصغر من 230 نانومتر. ولكن الإشعاع الشمسي لا يحتوي على هذا النوع من الإشعاعات المدعوة بالإشعاع فوق البنفسجي البعيد، لدى وصوله سطح الأرض، لكن الكلوروفيل يتمكن من إحداث الاصطناع الضوئي بامتصاصه أشعة الطيف المرئي من ضوء الشمس، ومن ثم إتمام عملية هذا الاصطناع عبر مراحل متعددة ومعقدة في النباتات. فعلى الرغم من أن النباتات تمتص الضوء الأحمر، وطاقته لا تتجاوز مقدار 40 كيلو سعر/مول، فإن هذا الامتصاص يمكّن الكلوروفيل من إنتاج الكربوهيدرات المذكورة (وهو أمر فريد في نظام هذا الكون) ذلك أن تفاعل الاصطناع السابق يحتاج إلى 112 كيلو سعر/مول.

تشكل الأوزون

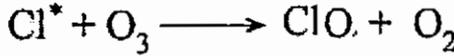
يتكوّن الأوزون O_3 في طبقات الجو العليا من جزيئات غاز الأكسجين العادي O_2 حسب التفاعل:



فبعد امتصاص كمّ من الإشعاع فوق البنفسجي (الخطوة 1)، يتفكك جزيء الأكسجين إلى ذرتي أكسجين (الخطوة 2). وتتفاعل ذرة الأكسجين مع O₂ لتشكل الأوزون (الخطوة 3).

تحطم الأوزون في طبقات الستراتوسفير العليا

تستعمل بعض ضروب مركبات الكلوروفلورميتان مثل CCl₂F₂ و CCl₃F موادّ مبرّدة. وهذه المركبات تنفذ إلى الستراتوسفير، حيث يطرأ عليها تفكك ضوئي، وتنتج ذرات Cl التي تتفاعل مع جزيئات الأوزون حسب التفاعل:



وهذا التناقص في المحتوى الأوزوني بطبقات الجو العليا يؤدي إلى وصول أشعة فوق بنفسجية أكثر إلى سطح الأرض.