

Η ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΣΗ ΣΑΝ ΦΩΤΟΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Είρήνης Δηλάρη - Παπαδημητρίου
Υφηγητριάς του Πανεπιστημίου Ἀθηνῶν

Ἡ φωτοσύνθεση σάν φυσικό φαινόμενο ἔχει ταυτισθῆ μέ τήν ἀφομοίωση τῶν φυτῶν. Καί σύμφωνα μέ αὐτά πού γνωρίζουμε σήμερα, γιά τό τόσο σπουδαῖο τοῦτο φυτοβιολογικό φαινόμενο, δέν εἶναι ὑπερβολή νά πῆ κανεῖς ὅτι χωρίς τήν φωτοσύνθεση δέν θά ὑπῆρχε ζωή στή γῆ, τουλάχιστον ὑπό τήν σημερινή της μορφή.

Μέ τις κλασσικές ἀπόψεις τῆς ἐπιστήμης, φωτοσύνθεση σημαίνει τό φαινόμενο ὅπου τά πράσινα φυτά χρησιμοποιοῦν τή φωτεινή ἐνέργεια γιά νά μετατρέψουν τό διοξείδιο τοῦ ἀνθρακος τῆς ἀτμοσφαιρας καί τό ὕδωρ σέ σάκχαρα καί ὀξυγόνο. Οἱ σημερινές ὁμως πρόοδοι τῆς ἐπιστήμης, εἰδικά στά φυτοβιολογικά φαινόμενα, μάς ἀναγκάζουν νά προβοῦμε σέ μιὰ οὐσιώδη ἀναθεώρηση τοῦ ὀρισμοῦ της.

Εἶναι σχεδόν βέβαιο ὅτι οἱ φωτοσυνθετοποιήτριες μονάδες τοῦ φυτοῦ, οἱ χλωροπλάστες* εἶναι αὐτάρκειες ὀντότητες, οἱ ὁποῖες μποροῦν καί παράγουν κάθε οὐσία πού ἔχουν ἀνάγκη γιά τήν ὑπόστασή τους, δηλαδή ἐκτός ἀπό τοὺς ὕδατάνθρακες (σάκχαρα) καί πρωτεΐνες (λευκώματα), λίπη, ἔνζυμα κλπ.

Φωτοσύνθεση, μέ τις σημερινές ἐπιστημονικές ἀντιλήψεις, σημαίνει τό πολύπλοκο φαινό-

* Χλωροπλάστες, ὅπως ἔδειξαν οἱ τελευταῖες μελέτες, κυρίως τῶν Σουηδῶν *Steinmann* καί *Sjostrand*, μέ τό ἠλεκτρονικό μικροσκόπιο, εἶναι σωματίδια διαμέτρου 3 — 10 *microns*, σαφῶς καθωρισμένης γεωμετρικῆς δομῆς, πού φέρονται διασπαρμένα μέσα στό κυτόπλασμα τοῦ φυτικοῦ κυττάρου σέ συγκέντρωση πού ποικίλλει ἀπό ἓνα μέχρι ἀρκετές ἑκατοντάδες, κατὰ φυσικό κύτταρο. Οἱ χλωροπλάστες ἀποτελοῦνται ἀπό λεπτοὺς δίσκους, μικροκοκκία (*grana*) πού εἶναι διατεταγμένα ἐπιφανειακά, σέ ἐπιφάνεια πάχους 30 \AA ἀλλά εἰδικά τοποθετημένα, ὅπου καί ἐντοπίζεται ἡ χλωροφύλλη, ἡ πράσινη χρωστική τῶν φυτῶν.

μενο όπου τα φυτά χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια κατά βάση για να διασπάσουν τα μόρια του ύδατος με ειδικό τρόπο, ώστε να παραχθεί οξυγόνο και επί πλέον διάφοροι χημικοί παράγοντες κυρίως όμως μια αναγωγική

φως + διοξείδιο του άνθρακος + ύδωρ +

$\frac{\text{χλωροφύλλη}}{\text{ένζυμα}} \rightarrow \text{οξυγόνο} + \text{σάκχαρο} +$

δύναμη που χρησιμοποιείται όχι μόνο για την αναγωγή του διοξειδίου του άνθρακος προς σάκχαρο, αλλά και για την σύνθεση όλων των άλλων ουσιών που είναι απαραίτητες για την ύπαρξη του φυτικού κυττάρου σαν βιολογικής μονάδας. Τα διάφορα οργανικά συστατικά που παράγονται και το φωτοσυνθετικό οργανισμό των χλωροπλαστών (φως) μεταφέρονται με τη βοήθεια του κυτοπλάσματος στα υπόλοιπα μέρη του φυτού, όπου και χρησιμοποιούνται σαν πρώτες ύλες για διάφορες συνθέσεις (βιοσυνθέσεις) άλλων ενώσεων, που πολλές από αυτές αποταμιεύονται και χρησιμοποιούνται σαν έφεδρικές ύλες πάλι από τους χλωροπλάστες, κυρίως στην περίοδο που παύει ο φωτοσυνθετικός οργανισμός (σκότος).

Ο όρισμός αυτός μας δίνει μια περιγραφή του φαινομένου της φωτοσύνθεσης σε γενικές γραμμές, πράγμα που σημαίνει ότι υποκρύπτει πολλές λεπτομέρειες του μηχανισμού του. Έντούτοις γίνεται φανερό ότι μπορούμε να θεωρήσουμε κάθε ένα χλωροπλάστη σαν ένα τέλει οργανωμένο πολύπλοκο μικροσκοπικό έργοστάσιο, που είναι θαυμάσια σε θέση κατά την άφομοίωση αλλά και σε άλλους βιολογικούς οργανισμούς, να τροφοδοτήσει το φυτό με έλεγχόμενη κυκλοφοριακά χημική ενέργεια, καθώς επίσης να τροφοδοτήσει το φυτό με διάφορες ουσίες κατά τρόπο εξαιρετικά ήλεγμένο για την αναγκαιότητα, την απόδοση και την καθαρότητα του παραγομένου είδους οργανικού μορίου. Η τέλεια λειτουργία της φυσικής αυτής έργοστασιακής μονάδας καταφαίνεται και από το γεγονός, ότι υπάρχει ιδανική σχέση μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης των προϊόντων στο ζώντα φυτικό οργανισμό. Φυσικά η επιτυχημένη απόδοση του φυτικού τούτου συκροτήματος στηρίζεται στην παρουσία ειδικευμένων ενζύμων, αλλά εξαρτάται επίσης και από πολλούς φυσικοχημικούς παράγοντες. Άλλωστε ένα από τα πιο σπουδαία επιτεύγματα στον άφορο την μελέτη των χλωροπλαστών σαν σύνολο θεωρείται η πειραματική διαπίστωση, ότι σημαντικό ρόλο στην ειδικευμένη τους δράση παίζει και η γεωμετρική τους δομή. Με άλλους λόγους η διαπίστωση ότι τα μόρια της χλωροφύλλης στα μικροκοκκία δεν εβρίσκονται εκεί διαταγμένα τυχαία, αλλά αντίθετα κατά τρόπο απόλυτα οργανωμένο.

Οι χλωροπλάστες εκτός της ηλιακής ενέργειας και του διοξειδίου του άνθρακος της ατμοσφαιρας χρησιμοποιούν, όπως αποδείχθηκε κατά το φωτοσυνθετικό τους οργανισμό και διάφορα άλλα συστατικά π.χ. νιτρικά, θειικά, φωσ-

φορικά κλπ. ιόντα ή και άλλες ουσίες που προσροφά το φυτό από το έδαφος. Θα ήταν δυνατό λοιπόν σύμφωνα με τα έκτεθέντα παραπάνω να δώσουμε μια γενική εξίσωση του φαινομένου της φωτοσύνθεσης:

(νιτρικά, φωσφορικά, θειικά, άμμωνιακά)
(κλπ. ιόντα, ίχνη ιόντων μετάλλων π.χ.)
(σιδήρου, μαγνησίου, μαγγανίου κλπ.)

(άμινοξέα, πρωτεΐνες, φωσφολιπίδια,)
(σουλφολιπίδια, νουκλεϊνικά όξέα κλπ.)

Γενική άνασκόπηση

Γενικά είτε άμεσα είτε έμμεσα οι ζώντες οργανισμοί του πλανήτη μας χρησιμοποιούν την φωτεινή ενέργεια κατά πολλούς και θαυμαστούς τρόπους. Το γεγονός τουτο δεν πρέπει να μας ξενίζει, καθ' όσον τα ζώα και τα φυτά με τις σημερινές τουλάχιστο συνθήκες διαβίου και διαιωνίζονται σε ένα κόσμο, όπου μόνη αλλά και πλούσια πηγή έξωτερικής ενέργειας προσφέρεται η ηλιακή ακτινοβολία.

Οι ηλιακές ακτίνες είναι αρκετά ισχυρές, αλλά και κατάλληλες να διεγείρουν πολλά φωτοευαίσθητα είδη οργανικών μορίων και κατόπιν τούτου να τα καταστήσουν ενεργειακά ικανά να λάβουν μέρος σε ειδικά φαινόμενα, που σήμερα πια είναι γνωστά σαν φωτοβιολογικά. Τα φαινόμενα τα σχετιζόμενα με την ηλιακή ενέργεια σε τελευταία άνάλυση χαρακτηρίζουν την τάση του ένοργανου κόσμου να ξεφύγει την κατάσταση της αδράνειας, στην οποία είναι καταδικασμένος, αν δεν έπωφεληθώ από την ενέργεια του περιβάλλοντός του. Τα φωτοβιολογικά φαινόμενα είναι δημιουργικά ένωμένα με την άεναο ανακύκλωση των άνασχηματισμών της ύλης, δηλαδή είναι ένωμένα με τη διατήρηση της ζωής πάνω στη γη. Η έκδηλουμένη στην φύση χημική δραστηριότητα πολλών οργανικών μορίων προς την κατεύθυνση π.χ. συνθέσεων σακχάρων, ουσιών βιολογικής σημασίας, αποδείχθηκε ότι δεν θα ήταν δυνατό στην κατάσταση της ήρεμίας τους, χωρίς την επέμβαση έξωτερικής ενέργειας. Η ηλιακή ακτινοβολία στην περίπτωση αυτή παίζει το ρόλο διεγερτικής δυνάμεως, που θέτει σε κίνηση ένα μηχανισμό, άλλως πως καταδικασμένο στην αιώνια άχρηστία. Ο πρωταρχικός ρόλος του ηλιακού φωτός στη βίοςφαιρα έχει σήμερα πλήρως αποδειχθεί, αφού σε πολλά βιολογικά φαινόμενα αποκαλύφθηκε και επιβεβαιώθηκε ο ρόλος του σαν κύριου παράγοντα.

Η μεγάλη σημασία της ηλιακής ακτινοβολίας στη γη άναγνωρίσθηκε πολύ νωρίς από τους κατοίκους της, γιατί όπως ήταν φυσικό το ηλιακό φως εκκέντρισε το ενδιαφέρον του ανθρώπου στις πιο άπομακρυσμένες χρονολογίες της ιστορίας του. Τη θεαματική διάλυση του σκότους και την εμφάνιση του άπλετου φωτός στην άνατολή του ήλιου, ο πρωτόγονος άνθρωπος την άντιμετώπισε με δέος άνάμικτο με κατάπληξη. Τη θερμαντική επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, ο πρωτόγονος άνθρωπος τη δέχτηκε με εύγνωμοσύνη, για τα έμφανη

ευεργετικά της αποτελέσματα. Ήρθε όμως η εποχή που ο ανθρώπινος νους, δειλά στην αρχή, συνδύασε την ηλιακή ακτινοβολία με τη φυσική βλάστηση και η φανερό τους αλληλεξάρτηση του προκάλεσε μεγάλη έκπληξη και ενδιαφέρον. Το γεγονός αυτό ήταν πολύ σημαντικό για την ιστορία της ανθρωπότητας, γιατί σήμανε την απαρχή της εξερευνησεως των φωτοβιολογικών φαινομένων που είναι τόσο συνυφασμένα με την ύπαρξή της.

Από τη στιγμή που ο άνθρωπος έπιασε στα χέρια του ένα σπόρο και τον εξέτασε προσεκτικά, έρευνητικά, μπορούμε να πούμε, ότι γεννήθηκε ο πρώτος έρευνητής σε ένα από τα πιο σπουδαία φωτοβιολογικά φαινόμενα, όπως είναι η αφομοίωση των φυτών ή πιο χαρακτηριστικά η φωτοσύνθεση. Σχετικά νωρίς ο άνθρωπος - έρευνητής κατανόησε την σημασία τούτου του φαινομένου και αντιλήφθηκε ότι χωρίς τη φωτοσύνθεση δεν θα υπήρχε ζωή στη γη. Ο άνθρωπος όμως δεν άρκεσθηκε στο να μείνει απλώς θεατής στα φυσικά φαινόμενα. Το πάθος της έρευνας τον είχε ήδη κατακτήσει και έτσι αισθάνθηκε την επιτακτική έσωτερική ανάγκη να αγωνισθώ να ξεδιαλύνει το ένα μετά το άλλο τα μυστηριώδη φαινόμενα της φύσεως, που ανάμεσά τους συγκαταλέγεται και η φωτοσύνθεση.

Ίσως η αφομοίωση των φυτών σαν βιολογικό φαινόμενο να ανήκει σε εκείνα που μελετήθηκαν περισσότερο από τον άνθρωπο. Η σοβαρή όμως έρευνητική απασχόληση με τα προβλήματα της συμπύπτει με την ανάπτυξη της Χημείας και ιδιαίτερα της Οργανικής Χημείας σαν ανεξάρτητης επιστήμης. Από την εποχή του Lavoisier το πρόβλημα της βιοσυνθέσεως των σακχάρων, που αποτελούσε και το μοναδικό πρόβλημα της φωτοσυνθέσεως, θεωρήθηκε ξευπαρχής σαν αποκλειστικό πεδίο των οργανικών χημικών. Και είναι γεγονός αναμφισβήτητο ότι όταν κανείς ανατρέξει στη σχετική βιβλιογραφία, μένει κατάπληκτος από τον φόρο της επίμονης και συστηματικής εργασίας στα θέματα αυτά. Τα ονόματα των μεγάλων οργανικών χημικών της εποχής εκείνης, όπως του Liebig, Fischer, Willstätter, Stoll και άλλων, είναι στενά συνυφασμένα με τις έρευνες αυτές. Φυσικά σχετικά με την εξέλιξη του φαινομένου της φωτοσυνθέσεως, αναπτύχθηκαν πολλές θεωρίες μέσα στα πλαίσια των δυνατοτήτων της εποχής εκείνης. Τελικά όμως καμμία από τις θεωρίες αυτές δεν επαληθεύθηκε πειραματικά και συνεπώς όλα τα θεωρητικά οικοδομήματα κατέρρευσαν. Έν τούτοις από το σύνολο των παλαιών εργασιών παράμεινε το πειραματικό μέρος που περιλαμβάνει κυρίως χημικές μελέτες στο πεδίο των σακχάρων και των πρασίνων χρωστικών των φυτών, σαν πολύτιμο βοήθημα στους νεώτερους έρευνητές.

Από την άποψη του έρευνητικού ενδιαφέροντος, η φωτοσύνθεση είναι ανάγκη να διαιρεθώ τουλάχιστο σε δυο κύρια μέρη. Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει το στάδιο του φαινομένου, που έχει σχέση με τη χρησιμοποίηση της ηλιακής ενέργειας που αλχημαλίζεται από την χλω-

ροφύλλη, αφού πρώτα μετατραπώ σε χημική ενέργεια, για την εκπλήρωση των διαφόρων χημικών μετασχηματισμών στο φυτικό οργανισμό. Το στάδιο αυτό καλείται «φωτο» στάδιο, σε αντίθεση προς το δεύτερο μέρος του φαινομένου που καλείται «σύνθεση». Στο συνθετικό στάδιο περιλαμβάνονται όλοι οι χημικοί μετασχηματισμοί, σαν σύνολο, που παθαίνει κυρίως ο άνθρακας του διοξειδίου του άνθρακος της ατμόσφαιρας, για να μετατραπώ στα διάφορα φωτοσυνθετικά προϊόντα.

Πρόοδοι στο συνθετικό στάδιο

Η συνθετική δράση των φυτών έχει πλέον κατά κάποιον τρόπο διαλευκανθώ ή τουλάχιστο είναι δυνατό να συμπεριληφθώ και να μελετηθώ στο γενικό πεδίο έρευνας της Βιοχημείας, πράγμα που σημαίνει ότι η εκτέλεσή τους δεν είναι αναγκαστικά συνυφασμένη με τα πράσινα φυτά.

Σήμερα π.χ. δεν είναι ανάγκη ο έπιστήμων να καταφεύγει σε διάφορα πολύπλοκα διανοητικά επινοήματα για να εξηγήσει φαινόμενα σαν τη βιοσύνθεση των σακχάρων. Ένα από τα πιο σημαντικά έπιστημονικά γεγονότα της τελευταίας είκοσαετίας είναι ότι αποκαλύφθηκε ο χημικός μηχανισμός του φαινομένου της βιοσυνθέσεως των σακχάρων από μια ομάδα έπιστημόνων στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας υπό τον Malvin Calvin. Η αμερικανική ομάδα κατόρθωσε να αποδείξει ότι η αφομοίωση των φυτών είναι ένας κύκλος χημικών αντιδράσεων του άνθρακος και επί πλέον κατόρθωσε να αναπαραγάγει ένα μέρος από το βιοσυνθετικό φαινόμενο στο εργαστήριό της. Η έπιτυχία της έσοτέφθηκε με το βραβείο Nobel (1961) και όπως πολύ σεμνά ανέφερε ο τιμηθείς έπιστήμων, M. Calvin, οφείλεται στην εξέλιξη της έπιστήμης στη στάθμη που έχει φθάσει σήμερα.

«Σήμερα είμαστε πιο τυχεροί έναντι των παλαιών έρευνητών — δυστυχώς 40 χρόνια αργότερα, λέγει ο M. Calvin — επειδή έχουμε στα χέρια μας μια μέθοδο έρευνας των ενδιαμέσων σταδίων του μηχανισμού των χημικών μετασχηματισμών στα φυτά, που είναι έντελως ανεξάρτητη από τις συντακτικές αναλογίες των αντιδρώντων ουσιών. Η πολύτιμη νέα μέθοδος στηρίζεται στη χρήση του «ιχνηθέτου άνθρακος», που είναι ένας ραδιενεργός άνθρακας (^{14}C) με ημιπερίοδο 5000 χρόνια. Ο ραδιενεργός άνθρακας—14, μετά τον πόλεμο (1945) ήταν έφικτος σε μας κατά ποσότητες.

Η μέθοδος στη θεωρητική της βάση είναι απλή: Γνωρίζαμε ήδη ότι τα πράσινα μέρη του φυτού απορροφούν διοξείδιο του άνθρακος από την ατμόσφαιρα, που κατόπιν τούτο, με τη διεγερτική επίδραση του απορροφούμενου ηλιακού φωτός, αντιδρά με το ύδωρ και τελικά παράγει υδατάνθρακα (σάκχαρα). Τούτο το γνωρίζαμε θετικά! Αλλά δεν γνωρίζαμε τί συμβαίνει πράγματι ανάμεσα στα δυο άκρα του φαινομένου. Για να λύσουμε το πρόβλημα που αντιμετωπίζαμε σκεφθήκαμε ότι σαν πρώτο βήμα στα πειράματά μας ήταν απαραίτητο να τροφοδοτήσουμε το υπό δοκιμασία φυτό με διοξει-

διο του άνθρακος «σημαδεμένο» με ραδιενεργό άνθρακα ($^{14}\text{CO}_2$), Και τούτο γιατί πιστεύαμε ότι ο «ίχνηθέτης άνθρακας» θα μας βοηθούσε με τη ραδιενέργειά του να παρακολουθήσουμε τους χημικούς μετασχηματισμούς του μέσα στο φυτό κατά το φωτοσυνθετικό φαινόμενο, μέχρις ότου ο ισότοπος άνθρακας φθάσει στο στάδιο να ενσωματωθεί στα σάκχαρα. Προβλέπαμε έξ αλλου ότι θα επισημαίναμε ταχύτερα στα πειράματά μας εκείνα τα ενδιάμεσα προϊόντα που παράγονται στην αρχή του βιολογικού κύκλου και αργότερα εκείνα που παράγονται βραδύτερα στο βιολογικό κύκλο. Τέλος πιστεύαμε ότι ο ραδιενεργός άνθρακας έπρεπε να εμφανισθεί στο τελευταίο στάδιο του φαινομένου, δηλαδή στα αποταμιευτικά σάκχαρα. Πειράματα βασισμένα στις απόψεις αυτές έγιναν για πρώτη φορά στο εργαστήριό μας.

»Για τον πειραματισμό μας χρησιμοποιήσαμε ένα φυτό — που για πολλούς λόγους θεωρήθηκε σαν το πιο κατάλληλο — τα φύκη (Algae) σε μια κατάσταση βιολογικής ωριμότητας, δηλαδή σε μια κατάσταση που το φυτό είναι σε θέση να απορροφά σταθερά διοξείδιο του άνθρακος, φως και ύδωρ, ενδιάμεσα να αποβάλλει οξυγόνο και τελικά να αποταμιεύει σάκχαρα. Τη κατάσταση αυτή τη χαρακτηρίζουμε «σταθερή κατάσταση» του βιολογικού οργανισμού στην φωτοσύνθεση. Μετά την αποκατάσταση λοιπόν της ισορροπίας αυτής και σε δεδομένη στιγμή τροφοδοτήσαμε το φυτό με ρεύμα διοξειδίου του άνθρακος, εμπλουτισμένο με σημαδεμένο διοξείδιο του άνθρακος ($^{14}\text{CO}_2$). Εύθως άμέσως αρχίσαμε να παρακολουθούμε την πορεία του μέσα στο φυτό παίρνοντας φωτογραφίες με νέα τεχνική, επωφελούμενοι από τη ραδιενέργεια του ισότοπου άνθρακος. Με τον τρόπο αυτό μπόρεσαμε να ελέγξουμε χρονολογικά τη διαδοχική εμφάνιση των ενδιάμεσων προϊόντων, κατά την πορεία των μετασχηματισμών του διοξειδίου του άνθρακος. Για την εξακρίβωση της χημικής φύσεως των ενδιάμεσων τούτων προϊόντων και πάλι μας βοήθησε η ραδιενέργεια των σημαδεμένων ενώσεων, καθ' όσον χρησιμοποιήσαμε τη «ραδιο-χαρτοχρωματογραφία» κατά αντιδιαστολή της απλής χαρτοχρωματογραφίας, γιατί στα χρωματογραφήματά μας έντοπιζαμε τα ενδιάμεσα ραδιενεργά προϊόντα με τη χρησιμοποίηση ευαίσθητων πλακών στις ακτίνες Χ.

»Μετά από επίμονα πειράματα αισθανθήκαμε εύτυχεις, γιατί κατορθώσαμε επί τέλους να ανακαλύψουμε τα ενδιάμεσα συστατικά της βιοσυνθέσεως των σακχάρων και να εξακριβώσουμε ότι ένα από τα πρώτα ενδιάμεσα συστατικά που εμφανίζονται στο βιολογικό κύκλο είναι το 3—φωσφορογλυκερινικό οξύ (P.G.A.). Και το σπουδαιότερο, ανακαλύψαμε την πρόδρομο του ένωση, δηλαδή τον άμεσο δέκτη του διοξειδίου του άνθρακος της ατμόσφαιρας. Η ένωση αυτή είναι ένα σάκχαρο, ή 1,5—διφωσφοροριβουλόζη (D.P.R.) που αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακος και κατόπιν διασπάται σε δυο μόρια 3—φωσφορογλυκερινικού οξέος (P.G.A.) που συνέχεια ανάγονται σε 3—φωσφορογλυκεριναλδεϋδη, που με τη σειρά της πια παθαίνει πολλούς χημικούς μετασχηματισμούς

και μετατρέπεται σε διάφορα σάκχαρα (πεντόζες, έξόζες, έπτόζες κλπ.). Οι ενώσεις αυτές τελικά οδηγούν στο εκάστοτε αποταμιευτικό σάκχαρο (π.χ. στα φύκη, στη σακχαρόζη) αλλά και μερικά στη 1,5—διφωσφοροριβουλόζη για να κλείσει τον κύκλο των αντιδράσεων, σαν δέκτης νέου διοξειδίου του άνθρακος από την ατμόσφαιρα κ.ο.κ.

»Έτσι γνωρίσαμε πειραματικά κάθε βήμα του κύκλου των αντιδράσεων στην αφομοίωση του διοξειδίου του άνθρακος στα φύκη, προς παραγωγή σακχάρων. Και τώρα πια πρέπει να τονίσουμε ιδιαίτερα ότι είμαστε σε θέση να αναγγείλουμε τούτο: «Ο πλήρης κύκλος της φωτοσυνθέσεως γίνεται σε ένα διαλυτό σύστημα ουσιών. Δηλαδή, τρόπος του λέγειν, μέσα σε μια φιάλη, με ένα κατάλληλο μίγμα χημικών αντιδραστηρίων. Από τη μια μεριά, στο εργαστηριακό μας σύστημα, διοχετεύουμε διοξείδιο του άνθρακος και από την άλλη μεριά συλλέγουμε το σάκχαρο γλυκόζη και όλα αυτά ανεξάρτητα από οποιοδήποτε φυτό, δηλαδή χωρίς την παρουσία οποιουδήποτε οργανωμένου μέρους του κυττάρου». (Από την ομιλία του M. Calvin ενώπιον της Chemical Society of London, 20 Οκτωβρίου, 1955).

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι τα πειραματικά αποτελέσματα, που ανακοίνωσε ο M. Calvin και οι συνεργάτες του άφορουν σε μεμονωμένα παραδείγματα (ώρισμα είδη φυτών, φως, «σταθερή κατάσταση» κλπ.). Και το σπουδαιότερο ότι τα πειράματα αυτά δεν θίγουν το βασικό έπίσης πρόβλημα της φωτοσυνθέσεως δηλαδή τον μηχανισμό της χρησιμοποιήσεως της ηλιακής ενέργειας. Αν και στο πεδίο τούτου έγιναν πολλές προσπάθειες και από άλλους έρευνητές, εν τούτοις πρέπει να αναγνωρίσουμε ότι το φαινόμενο της φωτοσυνθέσεως σαν σύνολο, εύρσκεται σε εξέλιξη.

Ένα από τα πιο σπουδαία προβλήματα που μένουν αναπάντητα στο στάδιο της «συνθέσεως» είναι η ακριβής πορεία όχι μόνο της βιοσυνθέσεως των σακχάρων, αλλά και της των πρωτεϊνών, των λιπών, των νουκλεϊνικών οξέων κλπ. φωτοσυνθετικών προϊόντων. Κατά τα τελευταία χρόνια είχε πράγματι αποδειχθεί, στα πειράματα διεξαγωγής του φωτοσυνθετικού κύκλου του άνθρακος, η παρουσία και άλλων ενώσεων που δεν είχαν σχέση με τα σάκχαρα όπως π.χ. του γλουταμινικού οξέος και του τρυπτικού οξέος. Οι παρατηρήσεις αυτές ακριβώς έδηγήσαν στην άποψη της ευρύτερης δράσεως των χλωροπλαστών και τελικά στην ανακάλυψη της αλληλεξαρτήσεως του βιοσυνθετικού κύκλου των σακχάρων με άλλους βιοσυνθετικούς οργανισμούς που κατευθύνουν την παραγωγή πρωτεϊνών, λιπών κλπ.

Είναι φανερό ότι στο δρόμο βιολογικού συστήματος λειτουργούν διάφορα συστήματα «ρυθμιστικές βαλβίδες» κατά τρόπο βέβαια πολύπλοκο αλλά θαυμαστό. Οι βαλβίδες αυτές αφίνουν στη κατάλληλη στιγμή να διαρρεύσουν από το βασικό φωτοσυνθετικό κύκλο, ώρισμα συστατικά που εν συνεχεία χρησιμοποιούνται σαν πρώτες ύλες προς την κατεύθυνση άλλων βιοσυνθέσεων. Ένα μάλιστα από τα προϊόντα αυ-

τά που διαπιστώθηκε ότι απομακρύνεται με ένα σύστημα βαλβίδος από την ανακύκλωση των αντιδράσεων προς σάκχαρα, είναι το φωσφορογλυκερινικό οξύ (P.G.A.). Με ένα πολύπλοκο μηχανισμό το φωσφορυλιωμένο αυτό οξύ οξειδώνεται σε ένα αμινοξύ την αλανίνη και εν συνεχεία σε άλλα αμινοξέα που οδηγούν τελικά στον σχηματισμό πρωτεϊνικών μορίων, ένζυμων κλπ. Έπιπροσθέτως αποδείχτηκε η σημασία του άκετυλο-ενζύμου Α (CoA) που με τη χαρακτηριστική του δράση, σαν μία τέλεια ρυθμιστική βαλβίδα συνδέει τα παράγωγα του κύκλου της βιοσυνθέσεως των σακχάρων με το γνωστό βιολογικό κύκλο των τρικαρβοξυλικών οξέων, δηλαδή τον κύκλο του Krebs. Κατόπιν διαπιστώθηκε η συνεργασία του φωτοσυνθετικού κύκλου με τη βιοσύνθεση προς την κατεύθυνση των λιπών και τουτο με την ενδιάμεσο δράση του άκετυλοφωσφορικού οξέος.

Η όλη αναλυτική εργασία της ομάδας M. Calvin έγινε πια μία κλασική μέθοδος και χρησιμοποιείται σαν πρότυπη μέθοδος σε άλλες παρόμοιες προσπάθειες με θαυμαστά αποτελέσματα. Έτσι για μία ακόμη φορά αποδεικνύεται η σημασία της καθαρής αναλυτικής εργασίας, που με τη βοήθεια των εξελίξεων της επιστήμης (έφαρμογή Ισοτόπων, χρωματογραφία κλπ.) διασαφηνίζει και τα πιο πολύπλοκα βιολογικά προβλήματα. Είναι πάντως εξακριβωμένο ότι τα πειραματικά επιτεύγματα του M. Calvin και των συνεργατών του έδωσαν την πρώτη σοβαρή και μεγάλη ώθηση στις έρευνες των φωτοβιολογικών προβλημάτων.

Μηχανισμοί μεταφοράς ενέργειας. Φωτο-στάδιο.

Στα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε η Φωτοβιολογία σαν ανεξάρτητος κλάδος της Βιοχημείας με ενδιαφέροντα που αυξάνουν άλματώδως και όρια που διευρύνονται συνεχώς. Ήδη έλαβε χώραν το 3ον Διεθνές Συνέδριο επί των προόδων της Φωτοβιολογίας στην Κοπεγχάγη (1960) όπου αναγγέλθηκαν τα νέα συμπεράσματα των ερευνητών αλλά και ετέθησαν οι βάσεις για νέες ερευνητικές εξορμήσεις. Ανάμεσα στα σπουδαιότερα θέματα του Συνεδρίου φυσικά συγκαταλέγεται και η Φωτοσύνθεση που κατέχει την πρώτη θέση στα φωτοβιολογικά φαινόμενα.

Η ιδιοτυπία των φωτοβιολογικών φαινομένων — κατά τα άλλα καθαρών βιοχημικών φαινομένων — ξεκινάει στο ότι το δρών σύστημα προσροφά έξωθεν φωτεινή ακτινοβολία και τη μεταβάλλει σε χημική ενέργεια που την χρησιμοποιεί εν συνεχεία για την «έναρξη», ή και για τη «διακοπή» της διεξαγωγής τους. Είναι λοιπόν φυσικό στο «φωτοστάδιο» των φαινομένων αυτών να κληθούν για να παίξουν το προδιαγεγραμμένο ρόλο τους, οι τρόπος του λέγειν «μεταφορείς» της χημικής ενέργειας που προκύπτει από τον μηχανισμό αυτό. Δηλαδή να κληθούν να δράσουν διάφορες κατάλληλες χημικές ενώσεις, που πρέπει να εύρισκονται σε

ένα είδος επιφυλακής, κάπου γύρω στο σημείο όπου απορροφάται ή φωτεινή ακτινοβολία από το δρών φυσιολογικό σύστημα. Η αποκάλυψη της φύσεως αλλά και του μηχανισμού της δράσεως των ενώσεων τούτων καλύπτει ένα σημαντικό μέρος από την όλη ερευνητική προσπάθεια σε παρόμοια φαινόμενα.

Οι «μεταφορείς», ενώσεις πλούσιες πια σε χημική ενέργεια, αποτελούν τους χημικούς ενεργειακούς «συμπαραγόντας» στα βιολογικά φαινόμενα. Με τη συμβολή τους οι «συμπαραγόντες», σαν δραστικές χημικές ενώσεις, διεγείρουν την διεξαγωγή του κυρίου σταδίου της «συνθέσεως». Το αποτέλεσμα είναι ότι παράγονται, βιοσυνθετικά, διάφορα συστατικά, που κατάλληλα διοχετεύονται στο ζώντα οργανισμό σε μέρη όπου, φυσικά, ή παρουσία τους είναι απαραίτητη. Ανάμεσά τους συγκαταλέγονται και οι ενώσεις «μεταφορείς» της ενέργειας, που σε τελευταία ανάλυση κυκλοφορούν τη χημική ενέργεια μέσα στο φυσιολογικό σύστημα για την ανακύκλωση του βιολογικού φαινομένου.

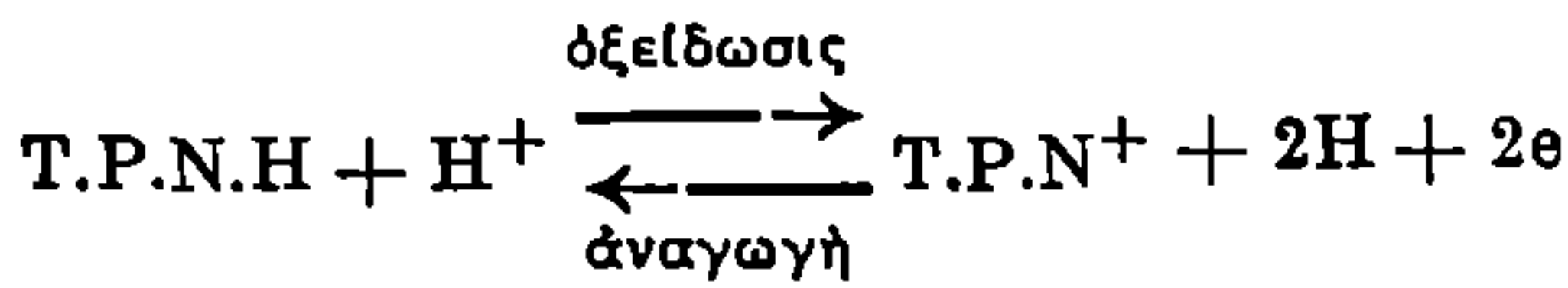
Είναι γνωστό ότι στα διάφορα ζώα — και φυτο-βιολογικά φαινόμενα, τον σπουδαιότερο ρόλο σαν «συμπαραγόντες» τον παίζουν δραστικές ενώσεις που έχουν άμεσα σχέση με οξειδωτικές και αναγωγικές αντιδράσεις. Και τουτο είναι λογικό καθ' όσον οι περισσότερες βιοσυνθέσεις υπάγονται σε οξειδωτικά και αναγωγικά φαινόμενα. Πολλά μάλιστα, από τα βιολογικά οξειδο-αναγωγικά φαινόμενα έχουν λεπτομερώς μελετηθεί και εξηγηθεί από χημικής αλλά και από φυσικοχημικής πλευράς, ιδίως από θερμοδυναμικής και κινητικής σκοπιάς.

Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι πολλά φωσφορικά παράγωγα, ιδίως πολυφωσφορικά οργανικά παράγωγα, είναι ενώσεις με υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο. Επίσης έχει επιβεβαιωθεί ότι πολλά από αυτά τα φωσφορικά παράγωγα μπορούν κάλλιστα να προκύψουν από το συνδυασμό διαφόρων οξειδωτικών αντιδράσεων. Άλλωστε ο σημαντικός ρόλος των φωσφορικών ενώσεων στα βιολογικά φαινόμενα είναι γεγονός θετικά πια εξακριβωμένο. Έτσι εξηγείται και η παρουσία των φωσφορυλιωμένων ενώσεων κατά τις βιοσυνθέσεις π.χ. των σακχάρων στην άφομοίωση των φυτών. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός, ότι το ενδιαφέρον της έρευνας των φωσφορικών ενώσεων από χημικής, φυσικοχημικής και φυσιολογικής πλευράς έφθασε το maximum.

Ιδιαίτερη σημασία από της απόψεως αυτής παρουσιάζει η τριφωσφορική αδενοσίνη, ένωση αρκετά πολύπλοκη, που τη συναντούμε εμπλεγμένη σε πολλά βιολογικά φαινόμενα. Παρόμοια δράση παρουσιάζει και η αντίστοιχη διφωσφορική αδενοσίνη. Συνήθως οι ενώσεις αυτές παρίστανται με A.T.P. και A.D.P. Συγκεκριμένα, με φυσικοχημικές μελέτες αποδείχθηκε ότι ο σχηματισμός των πολυφωσφορικών δεσμών της A.T.P. απαιτεί 36000 cal. Συνεπώς το πρόβλημα της παρασκευής της λύεται ενεργειακά, μόνον όταν συνδεθεί με μίαν οξειδωτική αντίδραση όπου εκλύεται ενέργεια.

Τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν με την άποψη ότι μία αντίδραση κατάλληλη να

παίξη το ρόλο αυτό στους ζώντας οργανισμούς είναι η βιολογική οξειδωση του άνηγμένου τριφωσφορο - πυριδινονουκλεοτιδίου — αλλά και του διφωσφορο — κατά την οποία εκλύονται 50000 cal. Το άνηγμένο τριφωσφορο - πυριδινονουκλεοτίδιο (T.P.N.H., συνένζυμο II, συνζυμάση) που απέδειχθη ότι συμβάλλει στον φωτοσυνθετικό κύκλο του άνθρακος είναι ένα τέλειο αναγωγικό αντιδραστήριο και είναι συνυφασμένο με ένα από τα σπουδαιότερα βιολογικά οξειδοαναγωγικά συστήματα:



Σάν οξειδωτικό αντιδραστήριο στο σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθῆ μοριακό οξυγόνο, αλλά και οποιαδήποτε ἄλλη οξειδωτική ἔνωση που παράγεται ἐνδιάμεσα σέ ένα βιολογικό κύκλο. Ἡ ἀντίδραση αὐτή τῆς οξειδώσεως μπορεί νά χρησιμοποιηθῆ κάλλιστα γιά τή πολυφωσφορυλίωση τῆς ἀδενοσίνης, δηλαδή γιά τήν παραγωγή τῆς A.T.P., ἐξ οὗ και ἡ ὀνομασία τοῦ μηχανισμοῦ τούτου «οξειδωτική φωσφορυλίωση». Ἐπιπροσθέτως εἶναι κατανοητό ὅτι τὰ άτομα τοῦ ὑδρογόνου και τὰ ἠλεκτρόνια που παράγονται κατά τήν οξειδωση τοῦ T.P.N.H., χρησιμοποιοῦνται σάν ἀναγωγικά μέσα σέ ένα βιολογικό κύκλο.

Ἰδιαίτερα στή φωτοσύνθεση, στό εἰδικό φωτοβιολογικό φαινόμενο που μάς ἀπασχολεῖ τὸ ἐνδιαφέρον τὸ παρὸν ἄρθρο, εἶναι γεγονός ὅτι ἡ A.T.P. και τὸ T.P.N. (ἀνηγμένο ἢ οξειδωμένο) παίζουσι τὸ κύριο ρόλο σάν «συμπαράγοντες». Ἡ διαπίστωση αὐτή ἀποτελεῖ μία σημαντική πρόοδο στίς γνώσεις μας ὡς πρὸς τή φωτοσύνθεση. Τοῦτο δὲν σημαίνει ὅμως ὅτι οἱ γνώσεις μας εἶναι ἐπαρκεῖς γιά νά διαλευκάνουμε πλήρως τὸ φωτοστάδιο, ὥστε νά εἶναι δυνατό νά τὸ ἀναπαραγάγουμε στό ἐρευνητικό ἐργαστήριον. Ἡ ἄγνοια τοῦ ὀρθοῦ μηχανισμοῦ προελεύσεως τῶν A.T.P. και T.P.N. καθώς και ἡ ἄγνοια τῆς φύσεως τῶν ἐνδιαμέσων οξειδωτικῶν ἢ ὑπάρξεως και ἄλλων συμπαράγοντων, ἀποτελοῦν προβλήματα που ἀπασχολοῦν ἐντατικά τοὺς εἰδικούς ἐπιστήμονας.

Και τώρα ἀπὸ τή σκοπιά που ἡ ἐπιστήμη ἐφθασε σήμερα με τίς πρόσφατες ἐξελίξεις, ὅς δοῦμε τί ἀκριβῶς γνωρίζουμε σχετικά με τὸ κύριο μηχανισμό τῆς ἀπορροφήσεως τῆς φωτεινῆς ἀκτινοβολίας ἀπὸ τὰ πράσινα μέρη τῶν φυτῶν και στή μετέπειτα ἀξιοποίησή της σάν χημική ἐνέργεια. Ὁ μηχανισμός αὐτός δὲν εἶναι πλήρως ἐξακριβωμένος. Ἀλλά δὲν εἶναι και ἐντελῶς ἀνεξήγητος στούς σημερινούς ἐπιστήμονες. Ἀλλωστε ἡ φύση τῆς φωτεινῆς ἀκτινοβολίας και ὁ τρόπος διαδόσεώς της εἶναι πιά γνωστά. Ἡ φωτεινὴ ἀκτινοβολία, τὸ φῶς, εἶναι μιὰ μορφή ἐνέργειας που λέγεται ἠλεκτρομαγνητική και μεταδίδεται ὑπὸ κυματοειδῆ μορφή στοιχειωδῶν ποσῶν της, τῶν «φωτονίων». Τὰ φωτόνια γενικώτερα, εἶναι στοιχειώδη ποσὰ ἐνέργειας που καλοῦνται κβάντα και ἡ ἐνέργειά τους ὑπολογίζεται με τήν ἐξίσωση τοῦ Einstein κβάν-

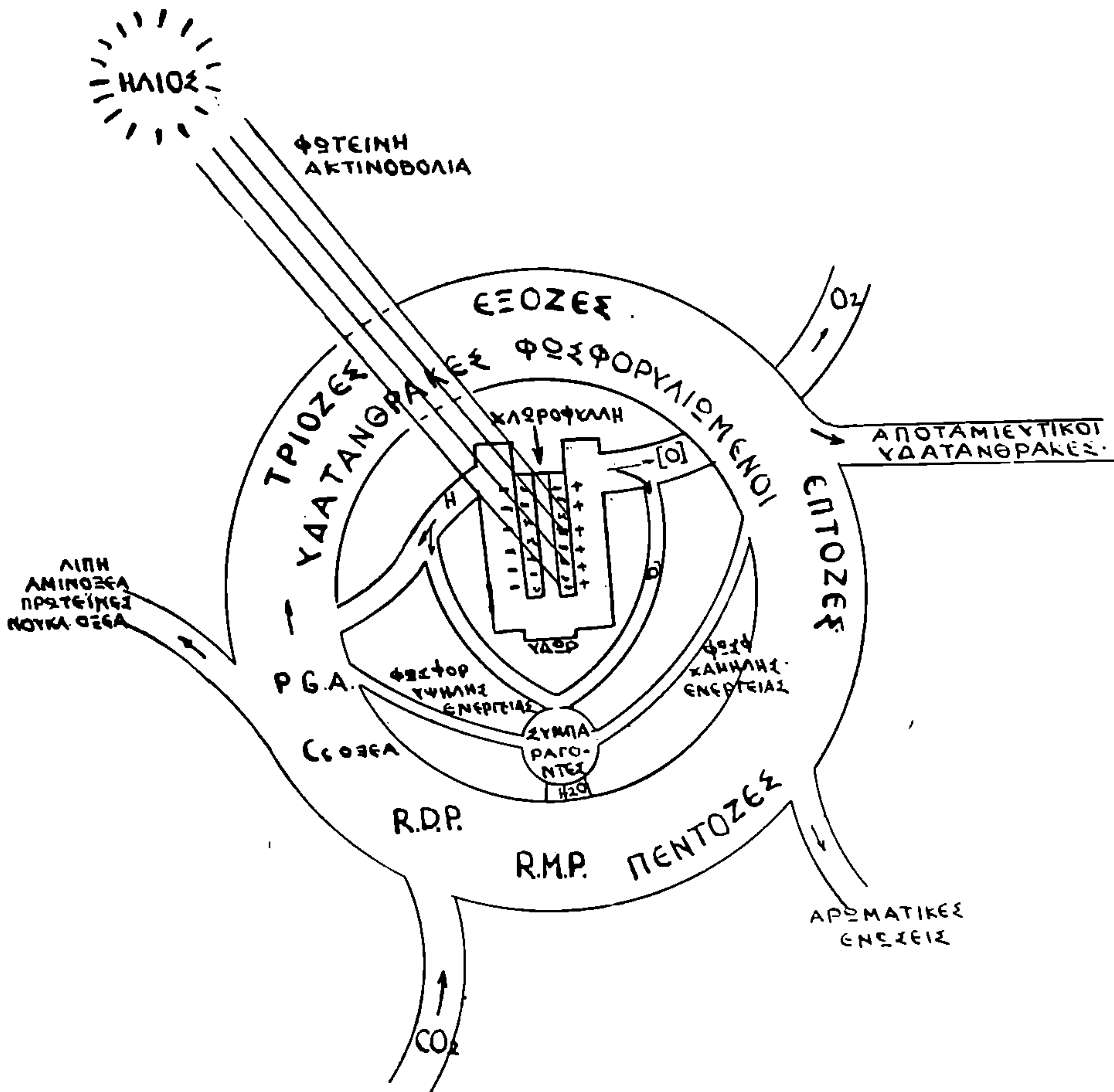
το = $h\nu$, ὅπου h εἶναι ἡ σταθερὰ τοῦ Planck και ν ἡ συχνότης τῆς διδομένης ἀκτινοβολίας. Τὸ σύνολο τῶν ἠλεκτρομαγνητικῶν ἀκτινοβολιῶν, δηλαδή τὸ ἠλεκτρομαγνητικὸ φάσμα, περιλαμβάνει διάφορες ἀκτινοβολίες που χαρακτηρίζονται ἀπὸ διάφορα κβάντα. Οἱ ἀκτινοβολίες αὐτές, κατά σειρά ἐνεργειακῆς ἰσχύος εἶναι γνωστὲς σάν ραδιοκύματα, μικροκύματα, ὑπεριώθη ἀκτινοβολία, ὀρατὸ φάσμα (φῶς), ὑπεριώθη ἀκτινοβολία, γ—ἀκτίνες, X—ἀκτίνες. Ἡ μελέτη τῆς συμπεριφορᾶς τῆς ἠλεκτρομαγνητικῆς ἀκτινοβολίας και τῆς ἀλληλεπιδράσεώς της με τήν ὕλη ἐξηγεῖται ἀρκετὰ με τοὺς νόμους τῆς Κβαντοφυσικῆς και εἰδικώτερα τῆς Κυματομηχανικῆς. Ἡ ἐκλεκτικὴ, χαρακτηριστικὴ ἀπορρόφηση τῶν κβάντων ἀπὸ τὰ διάφορα χημικὰ μόρια (ἢ και ἡ ἐκπομπή τους) εἶναι ἰδιότητες που καθίστανται φανερὲς ἀπὸ τήν ὕπαρξη χαρακτηριστικῶν μοριακῶν φασμάτων ἀπορροφῆσεως (ἢ και ἐκπομπῆς) (δηλαδή ἀπὸ χαρακτηριστικὲς περιστροφικὲς κινήσεις τῶν ἀτόμων ἢ και τῶν δμάδων μέσα στό μόριο ἢ ἀπὸ ἠλεκτρονιακὲς διεγέρσεις μέσα στὰ μοριακὰ ἠλεκτρονικὰ νέφη) ἀλλά και τέλος ἀπὸ χημικὲς διασπάσεις τοῦ μορίου ὅταν τὰ ἀπορροφούμενα κβάντα εἶναι ἐνεργειακὰ ἰσχυρά. Φυσικὰ τὰ φαινόμενα αὐτὰ γιά νά ἐξηγηθοῦν πρέπει νά μελετηθοῦν με τίς νέες ἐπιστημονικὲς ἀπόψεις εἰδ' ἄλλως παραμένουν ἀνεξήγητα, γεγονός που συνέβαινε στό παρελθόν.

Τελευταῖα ἀπέκτησαν μεγάλη σημασία τὰ χημικὰ φαινόμενα, που ἐνεργειακὰ σχετίζονται με τήν πρόσληψη ἢ και τήν ἐκπομπή διαφόρων κβάντων. Γὰ ἀντίστοιχα βιολογικὰ φαινόμενα καλοῦνται ἐπιστημονικὰ «κβαντο - βιολογικὰ» φαινόμενα, που πρὸς τὸ παρὸν ταυτίζονται ἀκόμη με τὰ φωτοβιολογικά, ἀλλά συνεχῶς τὰ ἕρῃα τους διευρύνονται.

Στό φωτοβιολογικό φαινόμενο «φωτοσύνθεση», ποῖ εἶναι και τὸ πιὸ σημαντικό κβαντοβιολογικό φαινόμενο, σάν πηγή ἠλεκτρομαγνητικῆς ἐνέργειας διατίθεται τὸ ἠλιακὸ σύστημα. Ὁ ἥλιος ἐκπέμπει μιὰ σύνθετη ἀκτινοβολία (διάφορα κβάντα). Ἀλλά μέχρι ὅτου ἡ ἠλιακὴ ἀκτινοβολία φθάσῃ τή γῆ, περνᾷ ἀπὸ τὰ ἀνώτερα στρώματα τῆς ἀτμοσφαιρας, ὅπου και ὑφίσταται ἓνα εἶδος φιλτραρίσματος τῶν ἰσχυροτέρων της κλασμάτων. Ἔτσι ἡ ἠλιακὴ ἀκτινοβολία, ὅταν φθάσῃ στή γῆ, συνίσταται ἀπὸ ἠλεκτρομαγνητικὲς ἀκτινοβολίες μήκους κύματος ἄνω τῶν 3000 Å, δηλαδή ἄνω τοῦ ὑπεριώθους φώτος. Συνεπῶς θὰ ἔπρεπε ν' ἀναμένεται, πράγμα που διαπιστώθηκε πιά, ὅτι οἱ ζῶντες ὀργανισμοὶ τοῦ πλανῆτη μας θὰ ἔχουν κατά κάποιον τρόπο ἀναπτύξει ἓνα κατάλληλο σύστημα χρησιμοποιήσεως τῆς ἠλεκτρομαγνητικῆς ἀκτινοβολίας αὐτῆς τῆς τάξεως. Τὰ κβαντοβιολογικὰ φαινόμενα τοῦ εἶδους αὐτοῦ καλοῦνται «φυσιολογικά».

Ἀπὸ τὸ ἐρευνητικὸ ἐνδιαφέρον που ἐκδηλώθηκε στίς τελευταῖες δεκαετίες στὰ θέματα αὐτὰ προκύπτουν τὰ ἑξῆς βασικὰ σημεῖα:

Ἡ ἀπορρόφηση τῆς ἠλιακῆς ἀκτινοβολίας ἀπὸ ἓνα ζῶντα ὀργανισμό ἐπιτυγχάνεται μόνο με διαφοροποιημένα πρὸς τήν κατεύθυνση αὐτῆς μόρια χημικῶν ἐνώσεων, που εἶναι ἐντοπισμένα



σέ κατάλληλες θέσεις μέσα στον οργανισμό. Δηλαδή θεωρείται πια βέβαιο ότι το ρόλο αυτό δεν μπορεί να τον παίξει οποιοδήποτε κυτταρικό συστατικό. Ήδη διαπιστώθηκε, ότι το υδωρ, οι πρωτεΐνες, τα λίπη κλπ. δεν παρουσιάζουν σημαντική απορρόφηση στην περιοχή του φάσματος τή σχετιζομένη με τα φυσιολογικά φαινόμενα.

Τά διαφοροποιημένα οργανικά μόρια στά βιολογικά φαινόμενα, οι άμεσοι απορροφηται τής ηλιακής ενέργειας, από θεωρητικής χημικής πλευράς, πρέπει να έχουν ειδική σύνταξη και ιδίως ειδική μοριακή ηλεκτρονική διάταξη και ειδική στερεοχημική δομή. Οι ενώσεις αυτές πρέπει να είναι ικανές ν' απορροφούν εκλεκτικά κβάντα από τήν προσπίπτουσα ακτινοβολία, να τα κρατούν για ένα χρονικό διάστημα (στάδια ευαισθητοποιήσεως) ακριβώς τόσο όσο χρειάζεται για να μεταφέρει τήν ενέργειά τους σέ άλλο μόριο, πριν ή απορροφουμένη ενέργεια μετατραπή σέ θερμότητα. Το χρονικό τουτο διάστημα φέρεται περίπου ότι είναι τής τάξεως 10^{-11} δευτερόλεπτα.

Από δ,τι είναι γνωστό στην κλασσική Όρ-

γανική Χημεία, ενώσεις που πληρούν τις πάρα πάνω ιδιότητες είναι διάφορα είδη χρωμάτων, ιδίως φυτικές χρωστικές που φυσικά κάθε μιὰ από αυτές θα δρα σαν «κβαντοδέκτης» με δικό της τρόπο.

Ακριβώς αυτό το ρόλο στην φωτοσύνθεση καλείται να παίξει, ή πράσινη χρωστική των φυτών, ή χλωροφύλλη. Σε γενικές γραμμές ένα μόριο χλωροφύλλης, ειδικά τοποθετημένο στή φυτικό κύτταρο, απορροφά εκλεκτικά κβάντα από το προσπίπτον φως και διεγείρεται ενεργειακά (σέ ένα ή περισσότερα στάδια όπου υφίσταται ενδομοριακούς μετασχηματισμούς) πρὸς μιὰ δραστική μορφή τής χλωροφύλλης. Η τελική αυτή μορφή, ή ευαίσθητη χλωροφύλλη, είναι ικανή στον καθωρισμένο χρόνο να επιδράση στα μόρια του υδατος που εύρισκονται γύρω στο σημείο τής απορροφήσεως και να τα διασπάση με μηχανισμό κατάλληλο ώστε το αποτέλεσμα να είναι ή παραγωγή οξειδωτικών και αναγωγικών ενώσεων που θα χρησιμοποιηθούν κατόπιν στο συνθετικό στάδιο του φαινομένου. Η αντίδραση αυτή, χωρίς όμως τις λεπτομέρειές της, ήταν γνωστή πολλά χρόνια πριν σαν

άντιδραση χλωροπλαστών ή αντίδραση Hill.

Με τις πρόσφατες επιστημονικές μελέτες στον τομέα της έρευνας του μηχανισμού της αντίδρασης Hill, που πρέπει τ' αποτελέσματά τους να θεωρηθούν πολύ σπουδαία, αποκαλύφθηκε με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, ή οργανωμένη διάταξη της χλωροφύλλης μέσα στα μικροκοκκία των χλωροπλαστών. Άκριβως στην ειδική αυτή διάταξη, λένουν οι έρευνητές, ή χλωροφύλλη δρά σαν φωτοευαισθητοποιητής σε ένα είδος μικροσκοπικής φωτομπαταρίας, που συνίσταται από κολλοειδή στρώματα λιποειδών και λιποπρωτεϊνών, διαχωριζόμενα με μόρια χλωροφύλλης. Η μηχανική αυτή απεικόνιση είναι πράγματι πάρα πολύ επιτυχημένη, γιατί είναι ή μόνη που μας βοήθησε να κατανοήσουμε (δχι όμως και να εξηγήσουμε πλήρως) το μηχανισμό της δράσης του άμεσου δέκτου της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας της χλωροφύλλης. Το τελικό αποτέλεσμα όμως της δράσης της ιδιότυπης αυτής φωτομπαταρίας διαπιστώνεται πάντοτε, ότι είναι μία παραγωγή ηλεκτρονίων στο ένα ηλεκτρόδιο της και παραγωγή οξυγόνου ή και οξειδωτικών προϊόντων στο άλλο ηλεκτρόδιο της. Προφανώς τα ηλεκτρόνια χρησιμοποιούνται για την άναγωγή του T.P.N⁺ προς T.P.N.H., που όπως ήδη αναφέραμε, φέρεται προορισμένο να λάβη μέρος σαν ύπόστρωμα στην οξειδωση που θα προκαλέσουν τα παραχθέντα οξειδωτικά αντιδραστήρια. Από την οξειδωση αυτή άλλωστε θα παραχθή ή ενέργεια, που απαιτείται για την παρασκευή της A.T.P. (οξειδωτική φωσφορυλίωση). Η τελευταία ένωση, ή A.T.P. θα δράσει πλέον σαν μεταφορέας της χημικής ενέργειας, που προήλθε από την απορροφηθείσα ακτινοβολία, μέσα στο βιολογικό σύστημα.

Όσον αφορά στο είδος του απορροφουμένου κβάντου από το μόριο της χλωροφύλλης, είναι πολύ σημαντική ή διαπίστωση της εκλεκτικής απορροφήσεως της χρωστικής αυτής. Επίσης είναι πάρα πολύ σημαντική ή διαπίστωση, ότι καλύτερη φωτοσυνθετική απόδοση λαμβάνεται όταν συνεργασθούν δύο διάφορα κβάντα, ένα μεγαλύτερας συχνότητας και το άλλο μικρότερης συχνότητας, παρά όταν δράσουν δύο κβάντα της αυτής συχνότητας. Η παρατήρηση αυτή κατεύθυνε μάλιστα τους επιστήμονες να ταχθούν με την άποψη του μηχανισμού δράσεως της χλωροφύλλης με ευαισθητοποίηση κατά στάδια, παρά με την άποψη του μηχανισμού, όπου ή χλωροφύλλη φέρεται άπλως σαν μεταφορέας ηλεκτρονίου προερχομένου από τή διάσπαση του ύδατος. Η τελευταία άποψη επικράτησε επί αρκετό χρονικό διάστημα.

Μία άλλη σπουδαία πειραματική διαπίστωση είναι ότι σε μία πολλαπλή ανάκλυση του φωτοσυνθετικού φαινομένου επιτυγχάνεται αξιοποίηση της απορροφουμένης ακτινοβολίας κατά 85%, γεγονός σημαντικά αξιοσημείωτο, αφού μία τέτοια αξιοποίηση δεν είναι δυνατή σε κανένα in vitro φωτοχημικό φαινόμενο.

Άπό έρευνητικής πλευράς μπορούμε να πούμε σαν ένα γενικό συμπέρασμα, ότι ή φωτοσύνθεση εύρσκεται σε εξέλιξη. Μία σχηματική παρά-

σταση που περιλαμβάνει περίπου όλο το βιοσυνθετικό όργανό, δίδεται πολύ επιτυχημένα από τον M. Calvin στο σχήμα της σελ. 201.

Είναι ίσως ακόμη πολύ πρόωρο να έλπίζουμε ότι γρήγορα θα έπιτευχθή ή in vivo φωτοσύνθεση άκριβως όμοια σε όλες τις λεπτομέρειες με τον in vitro μηχανισμό της. Έπειδή όμως ή δραματική εξέλιξη της επιστήμης κυρίως προς την κατεύθυνση της τεχνικής, έξώπλισε τους επιστήμονες με πολύτιμα όπλα έρευνας, για το λόγο αυτό μπορούμε και τολμούμε να σκεφτούμε, ότι πλησιάσαμε κατά τι την εποχή που ο άνθρωπος θα κληθή να δώσει απάντηση στα έρωτήματα που θέτει ένα από τα πιο έλκυστικά μυστικά της φύσεως. Τα όπλα αυτά είναι εργαστηριακά συστήματα, όπου οι χημικοί είναι δυνατό να διεξαγάγουν μέρη από τον φωτοσυνθετικό κύκλο με άπόλυτα αναπαραγώγιμα αποτελέσματα. Που σημαίνει ότι ο άνθρωπος απέκτησε ένα παρατηρητήριο από όπου μπορεί άσφαλώς πια να παρακολουθή την άφομοίωση των φυτών. Μία πλήρης αποκάλυψη του φαινομένου αυτού θ' αποτελέσει μοναδικό σταθμό στην ιστορία της ανθρωπότητας. Όσο και αν ή επιστήμη περνά την «άτομική» ήλικία της, εν τούτοις το μεγάλο έρωτηματικό της παραμένει ή αποκάλυψη με τή βοήθεια της Φυσικής και της Χημείας, του μηχανισμού του πολυπλόκου βιολογικού όργανου.

Τά μέχρι σήμερα έπιτεύγματα στη φωτοσύνθεση άνοίγουν πολλές προοπτικές και αναμένεται να προκύψουν πολλές συνέπειες επιστημονικές και κοινωνικές (δημόσια υγεία, διατροφή, κλπ.).

Ήδη σαν πρώτη σοβαρή συνέπεια πρέπει να θεωρηθή το γεγονός ότι γεννήθηκε ή άνάγκη ν' αναθεωρηθούν από πολλές άπόψεις τά διάφορα βιολογικά φαινόμενα. Έστω και αν οι γνώσεις που άποκτήσαμε πρόσφατα στη φωτοσύνθεση είναι έλλιπείς, εν τούτοις είναι άρκετές για να μας άποκαλύψουν ότι ή μακροσκοπική έμπειρία έρευνας των βιολογικών φαινομένων είναι άπόλυτα άνεπαρκής. Τά φυτικά κύτταρα, αλλά και τά ζωικά κύτταρα είναι μικροσκοπικές όντότητες του βιολογικού όντος που πρέπει να τά θεωρούμε σαν χωριστές μονάδες φυσικοχημικής δράσεως με άπόλυτη συνεργασία μεταξύ τους. Το καταστάλαγμα μόνο της δράσεώς τους εκδηλώνεται σε μας σαν βιολογικός όργανισμός. Είναι λοιπόν φανερό ότι δεν είναι δυνατό να έρευνούμε χημικούς μεταβολισμούς μέσα στο κύτταρο από τή σκοπιά της κλασικής Χημείας και Φυσικής. Σήμερα είναι γνωστό ότι ή δράση ενός άτομικού συγκροτήματος, ενός μορίου, μέσα στο κύτταρο, έξαρτάται από όλες τις φυσικοχημικές συνθήκες που συνετέλεσαν για την ύπαρξή του. Όστε λοιπόν είναι άνάγκη για τή μελέτη των διαφοροποιημένων κυτταρικών συστατικών (πρωτεΐνες, λίπη, σάκχαρα, νουκλεϊνικά όξέα κλπ.) να γνωρίζουμε πάρα πολύ καλά την πυρηνική τους διάταξη μέσα στο μόριο, αλλά και την ηλεκτρονιακή διασπορά γύρω από το μόριο (ηλεκτρονικά νέφη) και ακόμη την άπόλυτη στερεοχημική δομή τους και μάλιστα άκριβως κατά τή στιγμή

της δράσεώς τους. Ένα χαρακτηριστικό και απλό παράδειγμα αποτελεί και η χλωροφύλλη. Η χλωροφύλλη μέσα στο δοκιμαστικό σωλήνα δεν παρουσιάζει καν τις εκπληκτικές ιδιότητες της χλωροφύλλης των χλωροπλαστών, έστω και αν αμφοότερες έχουν το ίδιο συντακτικό τύπο.

Ακόμα όμως δεν είμαστε βέβαιοι αν η έξε-
ρεύνηση του κυττάρου (μικροσκοπική εξέταση)
θα είναι δυνατή με τις θεωρίες που επικρατούν
σήμερα, δηλαδή με τη θεωρία των Κβάντων
και της Σχετικότητας.

Βιβλιογραφία

1. E. Kessler: «Research in Photosynthesis», H. Gaffren, Edit., Interscience, New York (1957).
2. M. Calvin: «Photosynthesis», U. S. Atomic Energy Comm. Publ. No U. CRL — 3848. M. Calvin and J. A. Bassham, «The Photosynthesis of Carbon Compounds» W. A. Benjamin Inc., New York (1962).

3. J. A. Bassham, Proc. Colloq. Photobiol., Oregon State College (1958).
4. E. Steinman, F. S. Sjostrand, Exptl. Cell Research. 8, 15 (1955).
5. M. Calvin: «Proceedings of symposium on light and life», Johns Hopkins University Press, Baltimor, Md., (1960).
6. N. M. Sissakian, I. I. Filipovich, Invest. Akad. Nauk. SSSR, Ser. Biol. 834 (1957).
7. C. Whittingham: Endeavour, 173, (1955).
8. N. Good, R. Hill: Arch. Biochem. and Biophys. 57, 3551 (1955).
9. Y. A. Vladimirov, A. V. Konnev. Biofizika 2, 3 (1957).
10. Ε. Δηλάρη - Παπαδημητρίου: Χημικά Χρονικά, τόμος 22α, 11 (1957).
11. S. G. Wildman, Tasani Hongladorov: S. I. Honda 138, No 3538, (1962) 434 (1962).
12. T. F. Andreeva: Kernergie 3, 859 (1960).

