ePublishing

Open Schools Journal for Open Science

Vol 7, No 2 (2024)

Open Schools Journal for Open Science - Special Issue -IDEA Conference Proceedings

Ρίχνοντας κβαντικό φως στα βιολογικά σκοτάδια: Πώς η Κβαντική Βιολογία μπορεί να εξηγήσει τα άλυτα μυστήρια της φύσης

Ανδρέας Σωτήρχος, Αρχοντέλης Σωτήρχος

doi: 10.12681/osj.39495

Copyright © 2024, Ανδρέας Σωτήρχος, Αρχοντέλης Σωτήρχος

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0.

To cite this article:

Σωτήρχος Α., & Σωτήρχος Α. (2024). Ρίχνοντας κβαντικό φως στα βιολογικά σκοτάδια: Πώς η Κβαντική Βιολογία μπορεί να εξηγήσει τα άλυτα μυστήρια της φύσης. *Open Schools Journal for Open Science*, *7*(2). https://doi.org/10.12681/osj.39495

https://epublishing.ekt.gr | **e-Publisher:** EKT | **Downloaded at:** 11/01/2026 05:08:04

https://epublishing.ekt.gr | **e-Publisher:** EKT | **Downloaded at:** 11/01/2026 05:08:04

Ρίχνοντας κβαντικό φως στα βιολογικά σκοτάδια: Πώς η Κβαντική Βιολογία μπορεί να εξηγήσει τα άλυτα μυστήρια της φύσης

Σωτήρχος Ανδρέας
Σωτήρχος Αρχοντέλης
Υπεύθυνοι Εκπαιδευτικοί
Μαρίνου Χαρούλα, ΠΕ04.04
Τσουμάκης Τάκης, ΠΕ04.01

Ελληνογερμανική Αγωγή
Β΄ Λυκείου

Περίληψη
Η Κβαντική Φυσική είναι η επιστήμη που εξετάζει τη συμπεριφορά του μικρόκοσμου, δηλαδή των ατόμων και των υποατομικών σωματιδίων. Από την άλλη, η Βιολογία εξετάζει τα φαινόμενα της ζωής, τα οποία συναντώνται σε μεγαλύτερες κλίμακες, από τα αμινοξέα μέχρι τα οικοσυστήματα. Για την κατανόηση των βιολογικών φαινομένων, οι Βιολόγοι χρησιμοποίησαν το σώμα γνώσεων της Κλασικής Φυσικής και Χημείας, το οποίο μέχρι πρόσφατα θεωρούνταν αρκετό και ικανό για μια συνεκτική και συνεπή ερμηνεία του φαινομένου της ζωής. Μόλις τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αρχίσει να αναδύονται έρευνες πάνω σε νέα αλλά και παλαιότερα βιολογικά φαινόμενα, οι οποίες δείχνουν ότι η κλασική επιστήμη αδυνατεί να τα εξηγήσει ικανοποιητικά. Πολλοί επιστήμονες διερωτώνται αν αυτό οφείλεται στο ότι υπεισέρχονται κβαντικά φαινόμενα στα βιολογικά συστήματα, με αποτέλεσμα να έχει αναδυθεί ένας νέος διεπιστημονικός τομέας, αυτός της Κβαντικής Βιολογίας. Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στη συγκέντρωση των κυριότερων ανοικτών ζητημάτων που η Κβαντική Βιολογία επιχειρεί να απαντήσει στο πλαίσιο της κβαντομηχανικής θεωρίας. Εξετάζεται η επίδραση του κβαντικού φαινομένου της υπέρθεσης καταστάσεων στη φωτοσύνθεση, το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας στην ενζυμική κατάλυση και το φαινόμενο της κβαντικής διεμπλοκής στη μαγνητοαντίληψη των πτηνών. Τα αποτελέσματα της μελέτης μας δείχνουν να ενισχύουν την υποψία ότι τα κβαντικά φαινόμενα, όχι μόνο εμφανίζονται στα βιολογικά συστήματα, αλλά πλέον παρέχουν έναν καινοφανή τρόπο ερμηνείας και άλλων θεμελιωδών φαινομένων, όπως οι μεταλλάξεις, η όσφρηση και εσχάτως η συνείδηση.

Λέξεις κλειδιά: Κβαντομηχανική, φωτοσύνθεση, ενζυμική κατάλυση, μαγνητοαντίληψη πτηνών

1. Εισαγωγή

1.1 Κβαντική Φυσική

Μέχρι τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, τα επιτεύγματα της Κλασικής Φυσικής ήταν τόσο σπουδαία, ώστε να φαντάζει πως η Φυσική έχει φτάσει στο τέλος της. Η θεωρία του Newton για τη βαρύτητα και τους νόμους της κίνησης, μαζί με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell ερμήνευαν σχεδόν το σύνολο της πραγματικότητας. Όμως, παρά τα τεράστια επιτεύγματα, υπήρχαν κάποια φαινόμενα που δεν μπορούσαν να εξηγηθούν στο κλασικό πλαίσιο. Μεταξύ αυτών ήταν α) η ακτινοβολία μέλανος σώματος, β) το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και γ) τα γραμμικά φάσματα των αερίων. Επιστήμονες όπως ο Kirchhoff και ο Hertz μελέτησαν αυτά τα φαινόμενα. Ο Kirchhoff το 1859 δημοσίευσε μια

εργασία για τη θερμοδυναμική του μέλανος σώματος, ενώ ο Hertz το 1887 διεξήγαγε μια σειρά από εμπνευσμένα πειράματα πάνω στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Με τα γραμμικά φάσματα ασχολήθηκαν πολλοί επιστήμονες της εποχής (Beller, 1996). Το 1900, ο Planck έδωσε μια επιτυχή ερμηνεία της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, προτείνοντας ότι το μέλαν σώμα απορροφά και εκπέμπει την ακτινοβολία σε ενεργειακά πακέτα (κβάντα). Το 1905, ο Einstein εξήγησε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, χρησιμοποιώντας τη θεωρία του Planck για τα κβάντα. Πρότεινε ότι το φως αποτελείται από σωματίδια (κβάντα φωτός, φωτόνια), τα οποία η ύλη απορροφά επιλεκτικά. Ο Bohr το 1913 παρουσίασε ένα μοντέλο για το άτομο του Υδρογόνου, με το οποίο εξηγούσε το γραμμικό φάσμα του αερίου Υδρογόνου ως εκπομπή και απορρόφηση φωτονίων από τα άτομα (Bohr, 1913). Δέκα χρόνια αργότερα, ο Louis de Broglie πρότεινε την αρχή του κυματοσωματιδιακού δυισμού, θεωρώντας ότι όπως τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συμπεριφέρονται ως σωματίδια (φωτόνια), έτσι και τα σωματίδια (ηλεκτρόνια) έχουν κυματικές ιδιότητες (De Broglie, 1923). Το 1926, ο Schrödinger εισήγαγε μια κυματοσυνάρτηση για να περιγράψει τα σωματίδια – κύματα, με την οποία γίνεται εφικτό να υπολογιστεί η πιθανότητα ενός σωματιδίου να βρίσκεται σε μια ορισμένη θέση στον χώρο (Schrödinger, 1926). Σχεδόν ταυτόχρονα, ο Heisenberg ανακάλυψε την αρχή της απροσδιοριστίας, σύμφωνα με την οποία δεν είναι δυνατή η τέλεια γνώση όλων των φυσικών παραμέτρων ενός κβαντομηχανικού συστήματος (Heisenberg, 1927). Τα παραπάνω ορόσημα οδήγησαν στην ανάδυση της σύγχρονης Κβαντικής Φυσικής ως μιας θεωρίας που ερμηνεύει πλήρως τα φαινόμενα του μικρόκοσμου. Σύμφωνα με την τρέχουσα θεώρηση, ένα κβαντομηχανικό σύστημα παραμένει σε κυματική κατάσταση («κατάσταση υπέρθεσης») μέχρι τη στιγμή που θα διαταραχθεί. Η διαταραχή οδηγεί στην κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης σε μια από τις ιδιοτιμές της και η κυματική κατάσταση δίνει τη θέση της στη σωματιδιακή – το κύμα «συμπυκνώθηκε» και εντοπίστηκε στον χώρο. Η απροσδιοριστία που εμφανίζεται εγγενώς στις ιδιότητες των κβαντομηχανικών συστημάτων οδηγεί σε παράδοξα φαινόμενα, όπως το «φαινόμενο σήραγγας» και η «κβαντική διεμπλοκή», τα οποία αναλύονται παρακάτω (Hund, 1974).

1.2 Βιολογία και Κβαντική Φυσική

Η επιστήμη της Βιολογίας είναι η επιστήμη που μελετά τη ζωή. Καθώς τα βιολογικά συστήματα θεωρούνται πολύ «μεγάλα» σε σχέση με τα συστήματα του μικρόκοσμου των ατόμων, η Κλασική Φυσική μοιάζει το ιδανικό θεωρητικό υπόστρωμα πάνω στο οποίο πρέπει να απλωθούν οι ερμηνείες των βιολογικών φαινομένων. Παρ’ όλα αυτά, το 1944 ο Schrödinger, στο βιβλίο του «Τι είναι η ζωή;» πρότεινε την ιδέα ότι κβαντικά φαινόμενα μπορεί να υπεισέρχονται στις βιολογικές λειτουργίες (Schrödinger, 1967). Όμως μέχρι πρόσφατα οι επιστήμονες εξακολουθούσαν να στηρίζονται στο κλασικό οικοδόμημα. Τα τελευταία χρόνια, ένα αυξανόμενο πλήθος βιολογικών διεργασιών επανεξετάζεται υπό το πρίσμα της Κβαντικής Φυσικής. Πιο συγκεκριμένα, φαινόμενα όπως η φωτοσύνθεση, η δράση των ενζύμων και η μαγνητοαντίληψη των πτηνών ελέγχονται υπό ένα εντελώς νέο θεωρητικό πλαίσιο, το οποίο οδηγεί στη δημιουργία ένος νέου διεπιστημονικού κλάδου, της Κβαντικής Βιολογίας.

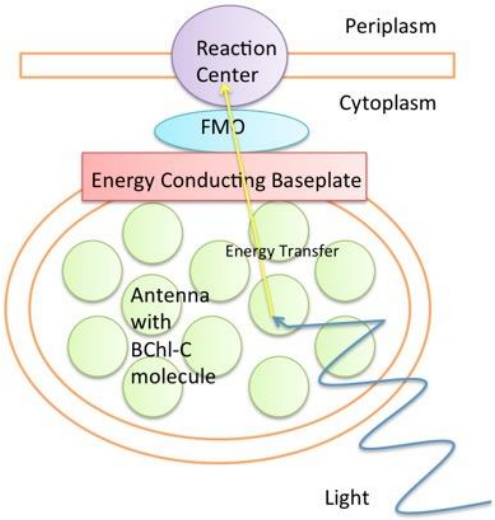
2. Κυρίως Μέρος

2.1 Φωτοσύνθεση

Στην επιστήμη της Βιολογίας με τον όρο «φωτοσύνθεση» εννοείται η χημική αντίδραση που πραγματοποιούν οι χλωροπλάστες ενός φυτού ώστε να εξασφαλίσουν ενέργεια. Πιο αναλυτικά, τα αντιδρώντα (διοξείδιο του άνθρακα και νερό) ενώνονται και παράγουν γλυκόζη και οξυγόνο (Blankenship, 2002). Ο μηχανισμός της αντίδρασης έχει ως εξής: Η διαδικασία της φωτοσύνθεσης πραγματοποιείται στους χλωροπλάστες, οι οποίοι αποτελούνται από θυλακοειδή, τα οποία με τη σειρά τους περιέχουν χλωροφύλλη (Εικόνα 1). Η χλωροφύλλη είναι μόριο το οποίο αποτελείται από

πολλά άτομα οξυγόνου και άνθρακα, με τον άνθρακα και το νάτριο να σχηματίζουν χημικούς δεσμούς με ένα άτομο μαγνησίου. Ως αποτέλεσμα, το μαγνήσιο αυτό έχει μονάχα ένα ηλεκτρόνιο στην εξωτερική του στοιβάδα. Όταν ένα φωτόνιο φτάνει στα θυλακοειδή, απορροφάται από το ηλεκτρόνιο και εγκαταλείπει το άτομο. Στη θέση του, πλέον, βρίσκεται μια θετικά φορτισμένη οπή, η οποία μαζί με το ηλεκτρόνιο ονομάζεται εξιτόνιο. Για να ολοκληρωθεί η διαδικασία της φωτοσύνθεσης όμως, πρέπει το εξιτόνιο να περάσει από θυλακοειδές σε θυλακοειδές για να φτάσει στο κέντρο αντίδρασης που θα παραχθεί η ενέργεια (Farquhar, 1989). Η κλασική θεώρηση υποστηρίζει ότι το εξιτόνιο περνά τυχαία από τα θυλακοειδή μέχρι να βρει το κέντρο αντίδρασης, ωστόσο αυτή η θεωρία είναι προβληματική. Η αποδοτικότητα της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης είναι σχεδόν 100%, γεγονός το οποίο δεν παρατηρείται σε τεχνικές διατάξεις συλλογής ηλιακής ενέργειας, όπως στα φωτοβολταϊκά πάνελ, τα οποία έχουν αποδοτικότητα περίπου 20%. Πώς γίνεται το εξιτόνιο να έχει τόσο μεγάλη επιτυχία στην εύρεση του κέντρου αντίδρασης, αν η πορεία του είναι τυχαία; Την απάντηση σε αυτό το πρόβλημα επιχειρεί να δώσει η Κβαντική Βιολογία. Σύμφωνα με τη νέα θεώρηση, το εξιτόνιο βρίσκεται σε υπέρθεση καταστάσεων, δηλαδή λειτουργεί ως κύμα κι όχι ως σωματίδιο. Στον μικρόκοσμο ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να βρεθεί σε πολλές θέσεις ταυτόχρονα ως ηλεκτρόνιο – κύμα. Κάθε θέση έχει μια συγκεκριμένη πιθανότητα εντοπισμού του ηλεκτρονίου αν καταρρεύσει η κυματοσυνάρτησή του. Όταν το εξιτόνιο αλληλεπιδράσει με το περιβάλλον του, η κυματοσυνάρτηση καταρρέει. Η Κβαντική Βιολογία προτείνει πως το εξιτόνιο, αντί να μετακινείται τυχαία, βρίσκεται σε κατάσταση υπέρθεσης και παίρνει κάθε δυνατή διαδρομή μέχρι που η κυματοσυνάρτηση καταρρέει στο κέντρο αντίδρασης (Engel, 2011).

Εικόνα 1: Μεταφορά εξιτονίου στο κέντρο αντίδρασης (Wikipedia)

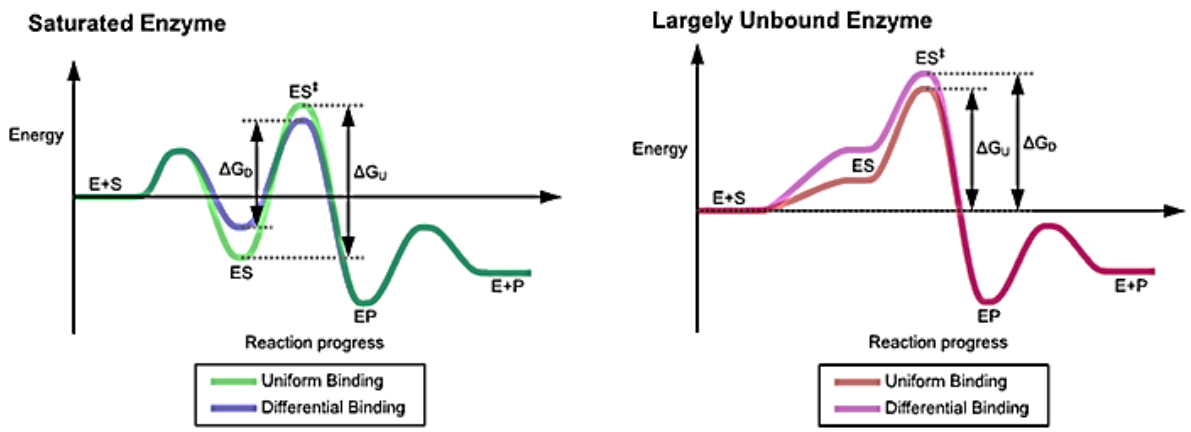


2.2 Ενζυμική κατάλυση

Τα ένζυμα είναι ειδικές πρωτεΐνες οι οποίες επιταχύνουν τις χημικές αντιδράσεις. Για να πραγματοποιηθεί μια χημική αντίδραση, απαιτείται ένα ορισμένο ποσό ενέργειας. Η δουλειά των ενζύμων είναι να μειώνουν αυτό το ποσό ενέργειας σε μεγάλο βαθμό (Εικόνα 2). Το πρόβλημα που παρουσιάζεται έχει ως εξής: Σύμφωνα με τη Κλασσική Φυσική, η ικανότητα του ενζύμου να καταλύει αντιδράσεις δεν εξαρτάται από το είδος του ισοτόπου των ατόμων Υδρογόνου (Πρώτιο, Δευτέριο, Τρίτιο) που συμμετέχουν στην αντίδραση. Παρ' όλα αυτά, πειραματικά δεδομένα καταδεικνύουν ότι η ικανότητα του ενζύμου να καταλύει αντιδράσεις επηρεάζεται από το είδος του ισοτόπου (Hu et al., 2008). Η λύση που προτείνει η Κβαντική Βιολογία σε αυτό το πρόβλημα θεωρεί ότι ο μηχανισμός κατάλυσης χρησιμοποιεί το φαινόμενο της κβαντικής σήραγγας. Ένας τρόπος για

να εξηγηθεί αυτό το φαινόμενο είναι να δοθεί το παράδειγμα μιας μπάλας η οποία κυλάει πάνω σε έναν λόφο. Στην Κλασική Φυσική, αν στη μπάλα δεν δοθεί αρκετή ενέργεια για να υπερπηδήσει τον λόφο, θα επιστρέψει πίσω. Αντίθετα, στον μικρόκοσμο τα ηλεκτρόνια επειδή διαδίδονται ως κύματα όταν συναντήσουν ένα εμπόδιο (έναν «λόφο») έχουν μια μικρή πιθανότητα να βρεθούν στη απέναντι πλευρά δίχως να έχουν εξαρχής την απαιτούμενη ενέργεια για να το πετύχουν, δηλαδή, δίχως να χρειαστεί να περάσουν «πάνω» από το εμπόδιο, καθώς περνούν «από μέσα». Το φαινόμενο της κβαντικής σήραγγας μπορεί να συμβεί ακόμη και σε άτομα. Όμως, όσο μεγαλώνει η μάζα, τόσο πιο δύσκολα συμβαίνει, διότι μειώνεται η πιθανότητα διέλευσης. Το χαρακτηριστικό αυτό εξηγεί τη μείωση της ικανότητας των ενζύμων να καταλύουν χημικές αντιδράσεις όταν αυξάνεται ο αριθμός νετρονίων στον πυρήνα τους (Ranaghan, 2010).

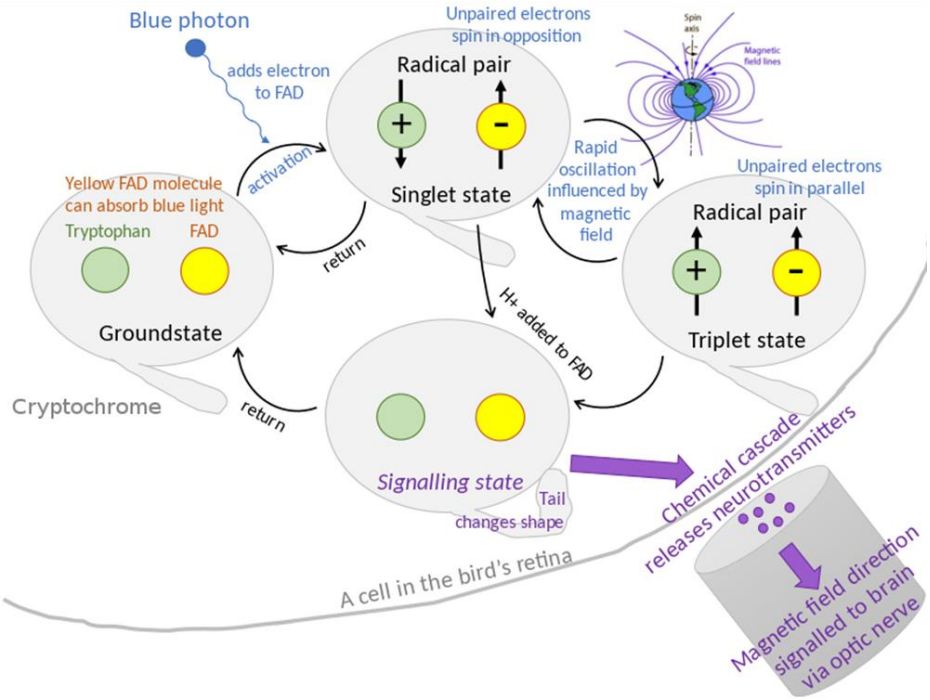
Εικόνα 2: Το ενεργειακό φράγμα μειώνεται με την παρουσία ενζύμου (Wikipedia)



2.3 Μαγνητοαντίληψη των πτηνών

Η ικανότητα ορισμένων πτηνών να προσανατολίζονται έχει αποτελέσει μυστήριο για εκατοντάδες χρόνια. Αν και δεν παρατηρείται σε όλα τα πτηνά, κάποια είδη έχουν την ικανότητα να ταξιδέψουν χιλιάδες χιλιόμετρα δίχως να χαθούν. Η εξήγηση του φαινομένου μπορεί να δοθεί επίσης από ένα κβαντομηχανικό φαινόμενο, το φαινόμενο της κβαντικής διεμπλοκής (Εικόνα 3). Όταν δύο στοιχειώδη σωματίδια δημιουργούνται μαζί, μοιράζονται την ίδια κυματοσυνάρτηση. Αυτό σημαίνει ότι λειτουργούν σαν να ήταν ένα σωματίδιο και μπορούν να επηρεάσουν το ένα το άλλο ακαριαία, ανεξάρτητα από τη μεταξύ τους απόσταση. Τέτοια σωματίδια θα μπορούσαν να είναι τα μονήρη ηλεκτρόνια (ηλεκτρόνια των εξωτερικών στοιβάδων των ατόμων) δύο μορίων που δημιουργήθηκαν από την ίδια φωτοχημική αντίδραση. Τα ηλεκτρόνια αυτά βρίσκονται σε κβαντική διεμπλοκή και έχουν συμπληρωματικά σπιν, δηλαδή το ένα έχει σπιν «up» και το άλλο έχει σπιν «down». Η κατάσταση αυτών των διεμπλεγμένων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από το συνδυαστικό αποτέλεσμα της επίδρασης του ασθενούς εξωτερικού μαγνητικού πεδίου της Γης και εσωτερικών αλληλεπιδράσεων με τους πυρήνες των ατόμων. Βρέθηκε ότι η διεύθυνση των μαγνητικών γραμμών του γήινου μαγνητικού πεδίου παίζει καθοριστικό ρόλο στον τρόπο με τον οποίο θα εξελιχθεί χρονικά η κατάσταση διεμπλοκής αυτών των ηλεκτρονίων. Ένα γνωστό αποδημητικό πτηνό είναι ο κοκκινολαίμης (Erithacus rubecula). Στο μάτι του κοκκινολαίμη και συγκεκριμένα στον αμφιβληστροειδή χιτώνα, υπάρχει η πρωτεΐνη κρυπτοχρωμίνη, η οποία είναι φωτοευαίσθητη. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να ανιχνεύσει το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των διεμπλεγμένων ηλεκτρονίων με το μαγνητικό πεδίο της Γης. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει τον κοκκινολαίμη να έχει μια αίσθηση της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου, το οποίο εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος. Επομένως, το φαινόμενο της κβαντικής διεμπλοκής μπορεί να ερμηνεύσει την ικανότητα του κοκκινολαίμη να προσανατολίζεται στη διεύθυνση Βορράς – Νότος (Telegdi, 1991).

Εικόνα 3: Ο μηχανισμός της μαγνητοαντίληψης (Wikipedia)



3. Συμπεράσματα/Επίλογος

Η Κβαντική Βιολογία μπορεί να προσφέρει μια νέα λεωφόρο στην πορεία προς την κατανόηση πολύπλοκων βιολογικών φαινομένων όπως η φωτοσύνθεση, η ενζυμική κατάλυση και η μαγνητοαντίληψη των πτηνών. Παρά το ότι η σχετική συζήτηση για τις ακριβείς ερμηνείες είναι ακόμη ανοικτή, ολοένα και περισσότερα φαινόμενα μπαίνουν στο στόχαστρο των επιστημόνων, οι οποίοι αρχίζουν να υποψιάζονται πως η κβαντομηχανική μπορεί εν τέλει να παίζει κυρίαρχο ρόλο σε βιολογικά φαινόμενα που συμβαίνουν σε μοριακό επίπεδο. Κάποια φαινόμενα τα οποία πιθανόν επίσης να εξηγηθούν στο μέλλον από την Κβαντική Βιολογία είναι η όσφρηση (Chukwuemeka, 2019), ο καρκίνος (Goh, 2020), ακόμα και η ανθρώπινη συνείδηση (Tuszynski, 2020). Όπως γλαφυρά έχει ειπωθεί, «Αν η ζωή θεωρηθεί σαν ένα δέντρο, τότε οι ρίζες βρίσκονται στον κβαντικό κόσμο ενώ ο κορμός του και το φύλλωμα είναι στον κανονικό ή κλασικό κόσμο» (Al-Khalili & McFadden, 2008).

4. Βιβλιογραφία

1. Al-Khalili, J., & McFadden, J. (2008). Quantum Coherence and the Search for the First Replicator. In Abbott, Davies P. C. W., Pati A. K., *Quantum Aspects of Life* (pp. 33-49). London: Imperial College Press.
2. Beller, M. (1996). The conceptual and anecdotal history of quantum mechanics. *Foundations of Physics, 26*(4), 545–557. https://doi.org/10.1007/bf02071220
3. Blankenship, R. E. (2002). *Molecular Mechanisms of Photosynthesis.* https://doi.org/10.1002/9780470758472
4. Bohr, N. (1913). On the constitution of atoms and molecules. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 26*(151), 1-25. https://doi.org/10.1080/14786441308634955.
5. Chukwuemeka, A. (2019). Quantum Biology: Can we explain olfaction using quantum phenomenon? https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.02529

6. De Broglie, L. (1923). Waves and Quanta. *Nature*, *112*, 540. https://doi.org/10.1038/112540a0
7. Engel, G. S. (2011). Quantum coherence in photosynthesis. *Procedia Chemistry*, *3*(1), 222-231. https://doi.org/10.1016/j.proche.2011.08.029
8. Farquhar, G. D., Ehleringer, J. R., & Hubick, K. T. (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, *40*(1), 503–537. https://doi.org/10.1146/annurev.pp.40.060189.002443
9. Goh, B. H. (2020). Quantum Biology: Does quantum physics hold the key to revolutionizing medicine? *Progress in Drug Discovery & Biomedical Science*, *3*. https://doi.org/10.36877/pddbs.a0000130
10. Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, *43*(3), 172–198. https://doi.org/10.1007/BF01397280
11. Hu, H., Lu, Z., Parks, J. M., Burger, S. K., & Yang, W. (2008). Quantum mechanics/molecular mechanics minimum free-energy path for accurate reaction energetics in solution and enzymes: Sequential sampling and optimization on the potential of mean force surface. *The Journal of Chemical Physics*, *128*(3). https://doi.org/10.1063/1.2816557
12. Hund, F. (1974). *The History of Quantum Theory*. Hanup, London.
13. Ranaghan, K. E., & Mulholland, A. J. (2010). Investigations of enzyme-catalyzed reactions with combined quantum mechanics/molecular mechanics (QM/MM) methods. *International Reviews in Physical Chemistry*, *29*(1), 65–133. https://doi.org/10.1080/01442350903495417
14. Schrödinger, E. (1926). An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. *Phys. Rev.*, *28*, 1049. https://doi.org/10.1103/PhysRev.28.1049
15. Schrödinger, E. (1967). *What is Life? & Mind and Matter: The Physical Aspect of the Living Cell*. Cambridge University Press.
16. Telegdi, V. L. (1991). "Is quantum mechanics for the birds?" In *Cambridge University Press eBooks* (pp. 193–206). https://doi.org/10.1017/cbo9780511563980.016
17. Tuszynski, J. (2020). From quantum chemistry to quantum biology: a path toward consciousness. *Journal of Integrative Neuroscience*, *19*, 687. https://doi.org/10.31083/j.jin.2020.04.393