

Open Schools Journal for Open Science

Vol 3, No 7 (2020)



Γιατί το φτερό του παγωνιού δεν είναι μπλε, μια μελέτη του χρωματισμού των πτηνών

Άρης Βούρος, Φωτεινή Εφετζή, Ηλίας Γιασεμής,
Πέτρος Καλογεράκος

doi: [10.12681/osj.24334](https://doi.org/10.12681/osj.24334)

Copyright © 2020, Άρης Βούρος, Φωτεινή Εφετζή, Ηλίας Γιασεμής,
Πέτρος Καλογεράκος



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

To cite this article:

Βούρος Ά., Εφετζή Φ., Γιασεμής Η., & Καλογεράκος Π. (2020). Γιατί το φτερό του παγωνιού δεν είναι μπλε, μια μελέτη του χρωματισμού των πτηνών. *Open Schools Journal for Open Science*, 3(7).
<https://doi.org/10.12681/osj.24334>



Γιατί το φτερό του παγωνιού δεν είναι μπλε, μια μελέτη του χρωματισμού των πτηνών

Βούρος Άρης¹, Εφετζή Φωτεινή¹, Γιασεμής Ηλίας², Καλογεράκος Πέτρος³

¹2^ο Γ.Ε.Λ. Αλίμου, Αθήνα, Ελλάδα

²Βιολόγος, 2^ο Γ.Ε.Λ. Αλίμου, Αθήνα, Ελλάδα,

³Φυσικός, 2^ο Γ.Ε.Λ. Αλίμου, Αθήνα, Ελλάδα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ερευνητικό ερώτημα της εργασίας αφορά το άνω καλυπτήριο ουράς του παγωνιού (*Pavo cristatus*) (βλ. εικόνα 1) και πώς αυτό αλλάζει χρώμα ανάλογα με την γωνία παρατήρησης και τον φωτισμό. Παρότι τρεις κύριες χρωστικές είναι συνήθως υπεύθυνες για το χρώμα των φτερών η επεξεργασία και μελέτη του φτερού έδειξε ότι αυτό δεν ισχύει για το συγκεκριμένο φτερό επιβεβαιώνοντας εν μέρει τις αρχικές υποψίες μας για δομικό χρωματισμό. Πράγματι το γαλαζοπράσινο χρώμα του φτερού οφείλεται μερικώς σε μικροσκοπικές δομές αλλά και σε χρωστικές ουσίες. Εν κατακλείδι συμπεραίνουμε ότι το χρώμα των φτερών αποτελεί μία πολυσύνθετη πτυχή της ζωής των πτηνών της οποίας η μελέτη χρήζει μεγάλη σημασία σε τομείς της ορνιθολογίας.





Εικόνα 1: Αρσενικό Ινδικό Παγώνι (*Pavo Cristatus*)

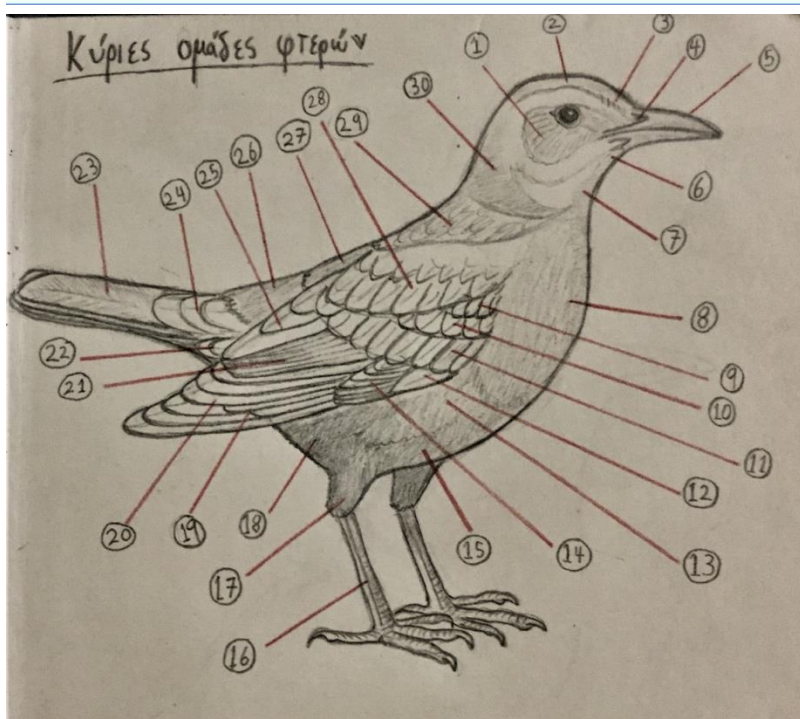
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

βιοφυσική, χρωστικές, δομικός χρωματισμός, ιριδισμός

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρακάτω κείμενο γίνεται αναφορά σε ορολογία που αφορά την τοπογραφία των πτηνών, τις οποίες επεξήγηση θα γίνει σε αυτήν την παράγραφο. Με τον όρο φτερά αναφερόμαστε στις κερατινοειδής δομές από τις οποίες καλύπτεται το σώμα των πτηνών και είναι αποκλειστικό χαρακτηριστικό αυτής της τάξης των οργανισμών και ως σύνολο αποτελούν το φτέρωμα του πτηνού. Το φτέρωμα στο σώμα των πτηνών είναι χωρισμένο και ονομασμένο ως εξής (βλ. εικόνα 2). Στην εργασία μας το φτερό στο οποίο γίνεται αναφορά αντιστοιχεί στον αριθμό 24 της εικόνας, δηλαδή είναι ένα από τα άνω καλυπτήρια της ουράς του παγωνιού.





Εικόνα 2: Κύριες ομάδες φτερών

: 1: Καλυπτήρια αυτιών, 2: Κορόνα, 3: Μέτωπο, 4: Ρουθούνι, 5: Ράχη ράμφους, 6: Πιγούνι, 7: Λαιμός, 8: Στήθος, 9: Μικρά καλυπτήρια, 10: Μεσαία καλυπτήρια, 11: Μεγάλα καλυπτήρια, 12: Πτερυγίδιο, 13: Πλευρά, 14: Καλυπτήρια πρωτευόντων, 15: Κοιλιά, 16: Ταρσός (Ταρσο-μετατάρσιο), 17: « Μπρος» Κνήμη, 18: Υπογάστριο, 19: Εγκόλπωση, 20: Πρωτεύοντα, 21: Δευτερεύοντα, 22: Κάτω καλυπτήρια ουράς, 23: Ουρά (Πηδαλιώδη), 24: Πάνω καλυπτήρια ουράς, 25: Τριτεύοντα, 26: Ουροπήγιο, 27: Πλάτη, 28: Ωμιαία, 29: Μανδύας, 30: Αυχένας

ΧΡΩΣΤΙΚΟΣ ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ

Μεγάλο μέρος της ομορφιάς των πτηνών οφείλεται στα φτερά τους και πιο συγκεκριμένα στη χρωματική ποικιλία που έχουν (Gill 2007). Από λευκό έως μαύρο και από έντονο πράσινο έως βαθύ κόκκινο τα φτερά των πτηνών υπάρχουν σε όλα τα χρώματα και τις αποχρώσεις. Η χρωματική ποικιλία των πουλιών οφείλεται κυρίως σε χρωστικές ουσίες οι οποίες δρουν απορροφώντας όλα τα μήκη κύματος του φωτός εκτός από ένα, με αποτέλεσμα οι παρατηρητές να βλέπουν στο φτερό το χρώμα που αντιστοιχεί στο ανακλούμενο μήκος κύματος (βλ. Εικόνα

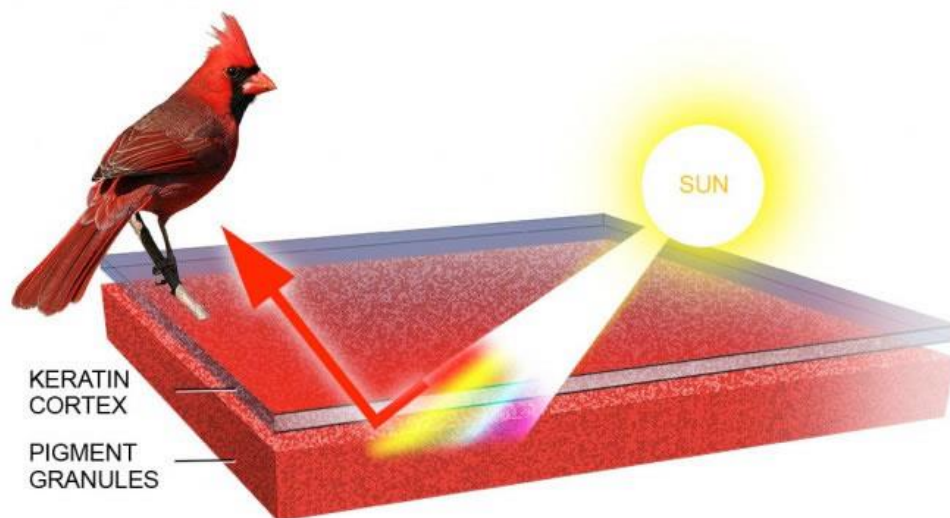
3)





Οι χρωστικές εναποθέτονται στα φτερά κατά την δημιουργία τους ως κόκκοι. Γνωρίζουμε ότι στα πούπουλα υπάρχουν τρεις κύριες χρωστικές : τα καροτενοειδή, οι πορφυρίνες και η μελανίνη. Τα καροτενοειδή προσδίδουν στα φτερά έντονες αποχρώσεις του κόκκινου ,πορτοκαλί και κίτρινου ,καθώς και ορισμένα μοβ και χρώματα ορατά μόνο σε υπεριώδη μήκη κύματος. Παράγονται από φυτικούς οργανισμούς και όχι από τα πτηνά τα οποία τις προσλαμβάνουν μέσω της διατροφής τους: είτε άμεσα από τους φυτικούς οργανισμούς είτε έμμεσα από άλλους οργανισμούς που έχουν καταναλώσει αυτούς .Οι πορφυρίνες βρίσκονται στα καφέ ή κόκκινου χρώματος φτερά και παράγονται από την ένωση αμινοξέων. Η χημική τους δομή είναι όμοια με αυτήν της αιμοσφαιρίνης και παρουσιάζουν έντονο κόκκινο φθορισμό υπό υπεριώδη ακτινοβολία UV. Η μελανίνη - που παράγεται από επεξεργασία του αμινοξέος τυροσίνη - είναι η πιο συνηθισμένη χρωστική καθώς εμφανίζεται σε σχεδόν όλα τα πτηνά με εξαίρεση αυτά που πάσχουν από αμελανισμό, φαινόμενο το οποίο οφείλεται στην απώλεια λειτουργικότητας της τυροσινάσης , ένζυμο που ελέγχει την παραγωγή της μελανίνης. Τα πτηνά που πάσχουν από αμελανισμό χαρακτηρίζονται από πλήρη απουσία της μελανίνης στα φτερά και στο σώμα τους. Υπάρχουν δύο ειδών μελανίνες στα φτερά : οι ευμελανίνες , που αποτελούνται από μεγάλους ομοιόμορφου σχήματος μαύρους κόκκους που ευθύνονται για τα σκούρα καφέ, μαύρα και γκρι χρώματα , και οι φαιομελανίνες που αποτελούνται από ανομοιόμορφου σχήματος κόκκους χρώματος καφέ που ευθύνονται για τα κόκκινα, και μπλε φτερά. Επιπροσθέτως, οι μελανίνες λόγω της αυξημένης ποσότητας κερατίνης στο μόριο τους αναλογούν σε αυξημένη ανθεκτικότητα των φτερών που τις περιέχουν (Bonser 1995).





Εικόνα 3 : Αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας των χρωστικών στα φτερά (Andrew Leach) Εικονίζεται Καρδινάλιος (*Cardinalius cardinalius*).

Παρατηρώντας όμως ένα πάνω καλυπτήριο ουράς παγωνιού (*Pano cristatus*) με γυμνό μάτι προσέξαμε ότι καθώς άλλαζε η οπτική γωνία παρατήρησης ή η γωνία πρόσκρουσης του φωτός σε αυτό, τότε φαινόταν να αλλάζει και το χρώμα του «οφθαλμού» από ανοιχτό πράσινο έως βαθύ μοβ, φαινόμενο που δεν μπορεί να αποδοθεί στις χρωστικές λόγω του τρόπου λειτουργίας τους ο οποίος αποδίδει στο φτερό μεμονωμένη χρωματική απόχρωση. Τέθηκε λοιπόν η απορία του τι μηχανισμοί συναντούνται στο φτερό αυτό που οφείλονται για την ποικιλοχρωμία αυτή.

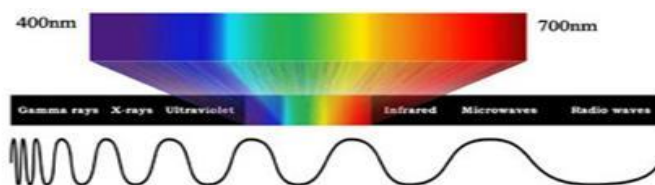
ΔΟΜΙΚΟΣ ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ

Ο χρωματισμός των φτερών, κυρίως τα πιο έντονα χρώματα αλλά και το απόλυτο λευκό οφείλονται πολλές φορές την ύπαρξη τους σε μηχανισμούς πέραν των χρωστικών. Οι μηχανισμοί αυτοί βρίσκονται στο επίπεδο της νανοκλίμακας και αποτελούνται από





ανακλαστικούς ιστούς με συγκεκριμένη μορφή (Gill 2007). Ο χρωματισμός που οφείλεται στις δομές αυτές ονομάζεται δομικός χρωματισμός και ευθύνεται για το μεγαλύτερο φάσμα των υπεριώδη ανακλάσεων, την ισχυροποίηση του υπάρχοντος χρωστικού χρώματος (Shawkey 2005) καθώς και του μπλε χρώματος των φτερών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το τελευταίο, καθώς στα πτηνά δεν αναλογεί σε καμία χρωστική και παράγεται μόνο μέσω του δομικού χρωματισμού (Bagnara et.al 2007). Μια απλουστευμένη εξήγηση του τρόπου λειτουργίας των δομών είναι η εξής: Το φως εμφανίζεται με την μορφή κυμάτων τα οποία χωρίζουμε σε διαστήματα μήκων αναλόγως με το χρώμα που παράγει δίνει το κάθε μήκος (βλ. εικόνα 4).



Περιοχή	Εύρος μηκών κύματος	Το χρώμα
Κόκκινου (Red)	760 nm – 630 nm	Κόκκινο (R) 700 nm
Πορτοκαλί (orange)	630 nm – 600 nm	Πορτοκαλί 620 nm
Κίτρινου (Yellow)	600 nm – 570 nm	Κίτρινο 580 nm
Πράσινου (Green)	570 nm – 490 nm	Πράσινο (G) 530 nm
Μπλε (Blue)	490 nm – 450 nm	Μπλε (B) 475 nm
Ιώδους (Violet)	400 nm – 440 nm	Ιώδες (μωβ) 440 nm
*Ινδικό (idigo) του Νεύτωνα	450 nm – 440 nm	

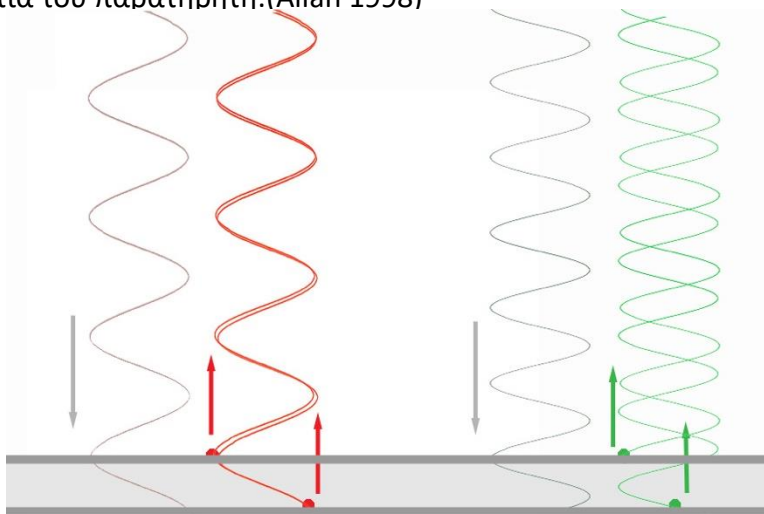
Εικόνα 4: Πίνακας στον οποίο παρουσιάζονται τα ορατά στον άνθρωπο χρώματα καθώς και το εύρος μηκών κυμάτων στο οποίο αντιστοιχούν.

Στο ηλιακό φως περιέχεται όλο το φάσμα των μηκών κύματος .Οι δομές αυτές περιέχουν τουλάχιστον μια μεμβράνη κερατίνης η οποία σε συνδυασμό με μόρια χρωστικής λειτουργεί ως





μια επιφάνεια ανάκλασης του φωτός. Συγκεκριμένα το φως ως κύμα εισερχόμενο σε αυτήν την μεμβράνη, ανακλάται εν μέρει στην εξωτερική μεριά της και το υπόλοιπο την διαπερνά και ανακλάται από την εσωτερική μεριά της ,και επιστρέφει στην ίδια κατεύθυνση σε δύο σειρές. Λόγω του ότι το μήκος κύματος που ανακλάται από την κάτω μεριά της μεμβράνης έχει ταξιδέψει μεγαλύτερη απόσταση , η οποία εξαρτάται από το πάχος και τον δείκτη διάθλασης της μεμβράνης , έχει διαφορά φάσης με το άλλο που ανακλάται απλώς στην επιφάνεια.(βλ. Εικόνα 5) Η διαφορά φάσης που έχουν εξαρτάται πέραν των προαναφερόμενων παραγόντων και από την γωνία πρόσκρουσης στη επιφάνεια του φτερού. Εάν τα μήκη κύματος έχουν διαφορά φάσης ακέραιο αριθμό μηκών κύματος τότε βρίσκονται εντός φάσης, φαινόμενο που συμβαίνει υπό ορισμένες γωνίες πρόσπτωσης του φωτός και ανακλούνται με τέτοιο τρόπο που να δείχνουν ένα έντονο χρώμα . Σε κάθε άλλη περίπτωση όπου τα μήκη των κυμάτων είναι εκτός φάσης παρατηρείται καταστρεπτική παρεμβολή των μηκών κύματος και το χρώμα αυτό δεν φτάνει στα μάτια του παρατηρητή.(Allan 1998)

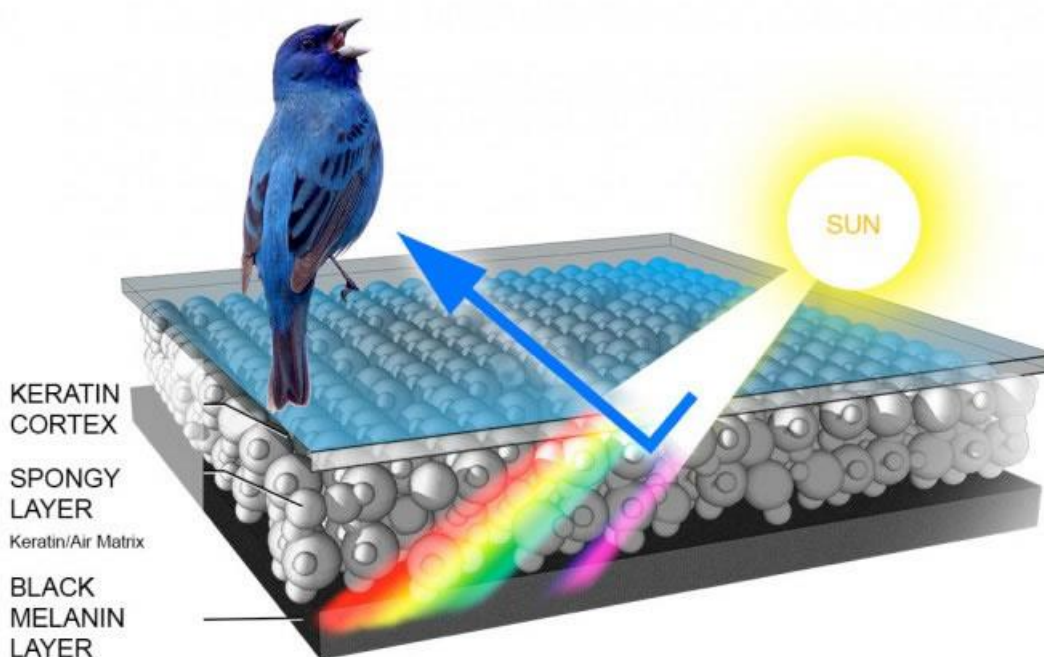


Εικόνα 5 : Υποτυπώδης αναπαράσταση των δομών στα φτερά των πτηνών από τις οποίες προέρχεται ο δομικός χρωματισμός. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το κόκκινο είναι εντός φάσης και είναι το χρώμα που θα φτάσει στο μάτι του παρατηρητή ενώ το πράσινο είναι εκτός φάσης και υφίσταται καταστρεπτική παρεμβολή και δεν θα είναι ορατό.





Στα φτερά στα οποία υπάρχουν αυτές οι δομές υπάρχουν τρεις τρόποι ανάκλασης του φωτός για την παραγωγή χρώματος (Gill 2007). Αρχικά σε φτερά από τα οποία είναι απύσχα η οποιαδήποτε χρωστική και οι δομές αυτές έχουν την μορφή κυτταρικών φυσαλίδων αέρα μπορεί να υπάρξει ασυνάρτητη ανάκλαση όλων των μηκών κύματος. με αποτέλεσμα να αποκτούν χρώμα απόλυτο λευκό. Δεύτερων ,μπορεί να υπάρξει συναρτημένη ανάκλαση του φωτός μέσω κοιλοτήτων αέρα οι οποίες δεν είναι οργανωμένες κατά κάποιο συγκεκριμένο τρόπο με αποτέλεσμα να υπάρχει ανάκλαση μόνο ενός μήκους κύματος από όποια κλίση πρόσπτωσης του φωτός ,άρα συνεπώς να παρατηρείται μόνο ένα χρώμα .Στην βάση των δομών αυτών υπάρχουν μόρια της χρωστικής μελανίνης τα οποία απορροφούν τις τυχαίως ανακαλούμενες ακτίνες φωτός ώστε να παρουσιάζεται πιο ομοιόμορφο το χρώμα. (βλ εικόνα 6)



Εικόνα 6: Αναπαράσταση της παραγωγής του μπλε δομικού χρώματος ως αποτέλεσμα της συναρτημένης ανάκλασης μηκών κύματος.(Andrew Leach) Εικονιζόμενο είναι ένα Γαλαζοσίχλονο (*Passerina cyanea*)

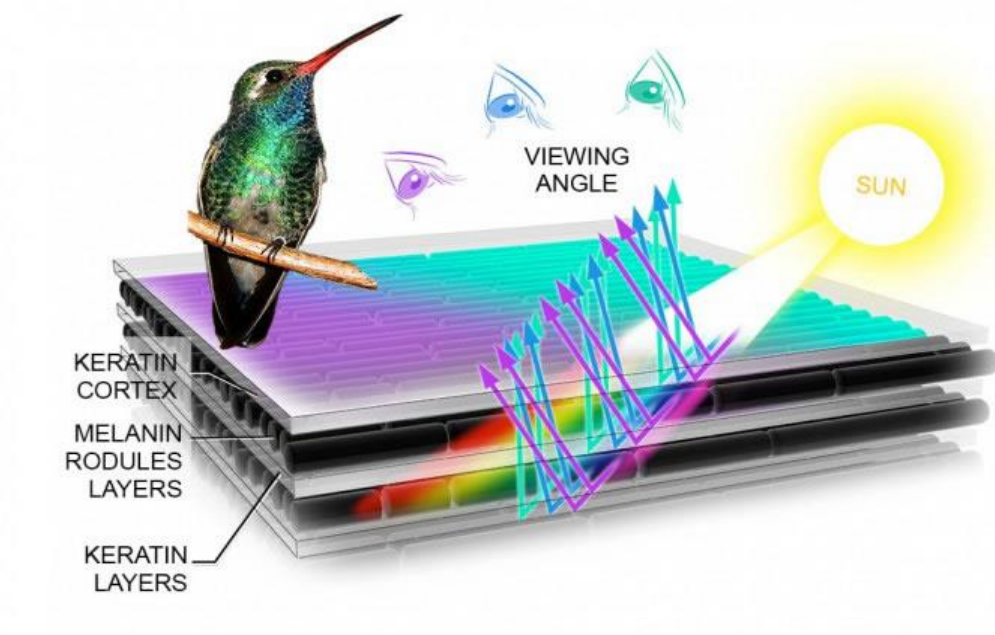




Τέλος, υπάρχει και η συναρτημένη ανάκλαση του φωτός η οποία οφείλεται σε δομές οι οποίες περιέχουν συστοιχίες κούφινων με αέρα κόκκων μελανίνης που ονομάζονται μαλανοσώματα. Αυτής της μορφής ο δομικός χρωματισμός είναι αυτός στον οποίο οφείλεται και το χρώμα του άνω καλυπτήριου ουράς του παγωνιού. Εναλλασσόμενες σειρές συστοιχιών μελανοσωμάτων και κερατινοειδών μεμβρανών είναι αυτές που επιτρέπουν στην διάθλαση του φωτός να λειτουργήσει ως πρίσμα χωρίζοντας το χρώμα σε διάφορα μήκη κύματος και ανακλώντας ένα διαφορετικό ανάλογα με την γωνία πρόσκρουσης του φωτός (βλ. εικόνα 7) δίνοντας το φαινόμενο που είναι γνωστό ως ιριδισμός. Να σημειωθεί πως αυτές οι δομές πρέπει να είναι παρατεταγμένες σε συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ τους ώστε να παράγουν αυτόν τον εναλλασσόμενο χρωματισμό και ότι η οποιαδήποτε απόκλιση από την καθορισμένη αυτή μορφολογία μπορεί να οδηγήσει στην ανάκλαση άλλων μηκών κύματα καθώς και την απώλεια της πολυχρωμίας του φτερού. Επιπλέον καθώς είναι φανερό πως οι μελανίνες παίζουν σημαντικό ρόλο στην δημιουργία του δομικού χρωματισμού και του ιριδισμού η απουσία τους, όπως σε κάποιο πτηνό που πάσχει από λευκισμό, θα είχε ως αποτέλεσμα την πλήρη απουσία χρώματος του φτερού όπως και συμβαίνει στα λευκιστικά παγώνια.

Τέλος εκτός από τα χρώματα που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος υπάρχουν και τα υπεριώδη χρώματα τα οποία στα πτηνά είναι ορατά. Αυτά τα χρώματα βρίσκονται κυρίως σε μπλε ή μοβ φτερά και παράγονται πρωταρχικά από δομικό χρωματισμό αλλά και από τα καροτενοειδή τα οποία όπως προαναφέρεται ανακλούν μεγάλο μέρος της UV ακτινοβολίας. Τα χρώματα αυτά παρόλο που δεν είναι εμφανή στον άνθρωπο έχουν τεράστια σημασία για την ζωή των πτηνών παίζοντας σημαντικό ρόλο στους τομείς της ερωτοτροπίας και επιλογής ταιριού, της αναζήτησης τροφής καθώς και της επικοινωνίας (Gill 2007)



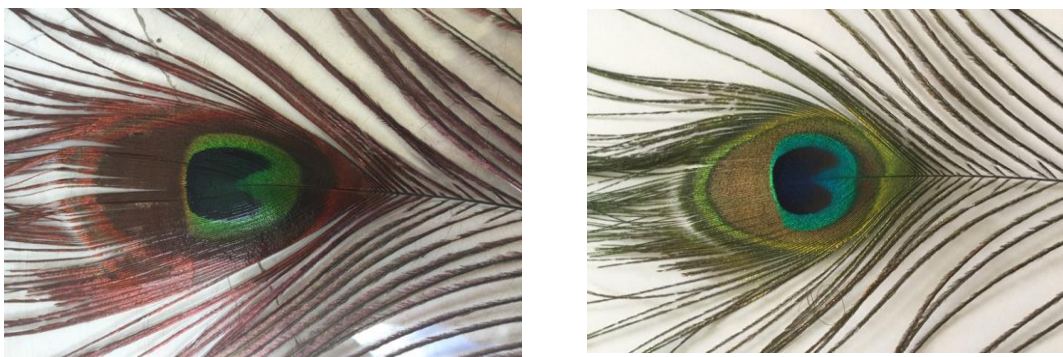


Εικόνα 7 : Αναπαράσταση των δομών που υπάρχουν στα ιριδίζοντα φτερά. Εικονιζόμενο είναι ένα Πλατύραμφο Κολίβριο (*Cyananthus latirostris*) ,είδος της αμερικανικής ηπείρου, όμως ο μηχανισμός αυτός είναι ίδιος για όλα τα πτηνά.(Andrew Leach)

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στην προσπάθεια μας να διερευνήσουμε το ερώτημα αυτό υποβάλλαμε το φτερό σε ποικίλλες καταστάσεις που πιστεύαμε ότι θα μπορούσαν μέσω των αποτελεσμάτων τους να μας βοηθήσουν να κατανοήσουμε την αινιγματική του ποικιλοχρωμία. Αποφασίσαμε αρχικά να βυθίσουμε σε νερό για να δούμε τι επίδραση θα έχει αυτό στο χρώμα του. Παρατηρήσαμε ότι χρώμα του φτερού πέραν του «οφθαλμού» μεταβλήθηκε από πράσινο σε καστανέρυθρο και δεν παρατηρούταν αλλαγή του χρώματος του όπως πριν. Στον «οφθαλμό» του φτερού παρατηρήθηκε μεταβολή χρώματος η οποία χαρακτηριζόταν από την απουσία του μπλε .Συγκεκριμένα δεν έπαψε να ιριδίζει όμως ιριδίζε μόνο μεταξύ αποχρώσεων του πράσινου και του κίτρινου χωρίς ποτέ να γίνεται μοβ η μπλε ως πριν (βλ. εικόνα 8).



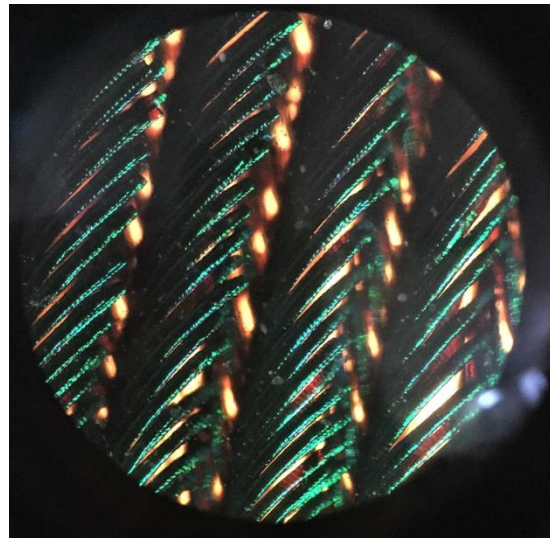


Εικόνα 8 : Αντιπαράβολή του άνω καλυπτήριου ουράς παγωνιού (*Pavo cristatus*) ύστερα από την βύθιση του σε νερό (πάνω) και σε φυσιολογικές συνθήκες (ατμοσφαιρικός αέρας).

Με την αλλαγή αυτή ο μόνος παράγοντας που επηρεάστηκε ήταν ο δείκτης διάθλασης του φωτός στην επιφάνεια του φτερού καθώς άλλαξε το μέσο διάθλασης από ατμοσφαιρικό αέρα σε νερό. Έπειτα από αυτήν την ενέργεια παρατηρήσαμε ότι η αλλαγή μέσου διάθλασης είχε ως αποτέλεσμα την αλλαγή του χρώματος του φτερού ενισχύοντας τις υποψίες μας ότι το χρώμα δεν οφείλεται αποκλειστικά σε χρωστικές αλλά και σε μηχανισμούς στους οποίους παίζει κυρίαρχο ρόλο το φως.

Ύστερα, με την χρήση του στερεοσκοπίου και μικροσκοπίου του σχολείου μας καταφέραμε να εστιάσουμε περισσότερο στο φτερό και να δούμε πιο προσεκτικά τους μηχανισμούς που υποθέσαμε ότι υπάρχουν. Κάνοντας χρήση του οπτικού μικροσκοπίου δεν μπορέσαμε να διακρίνουμε δομές οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελέσουν ειδοποιό διαφορά μεταξύ αυτού και άλλων μη ιριδίζοντος φτερού. Αυτό μας οδήγησε στην υπόθεση ότι οι δομές αυτές βρίσκονται στο επίπεδο της νανοκλίμακας η οποία βρισκόταν εκτός εμβέλειας του εξοπλισμού μας. Βέβαια η χρήση του μικροσκοπίου μας επέτρεψε μια πολύ πιο σημαντική παρατήρηση. Όταν εστιάζοντας στον «οφθαλμό» (σημείο του φτερού που δεν έπαψε να ιριδίζει κατά την βύθιση του σε νερό) φωτίζαμε το φτερό μόνο από την κάτω μεριά, παρατηρήσαμε ότι έχανε κάθε απόχρωση του μπλε και του πράσινου και αποκτούσε χρώμα καστανέρυθρο (όμοιο αυτού που είχε το υπόλοιπο φτερό κατά την βύθιση του σε νερό) (βλ. Εικόνα 9).

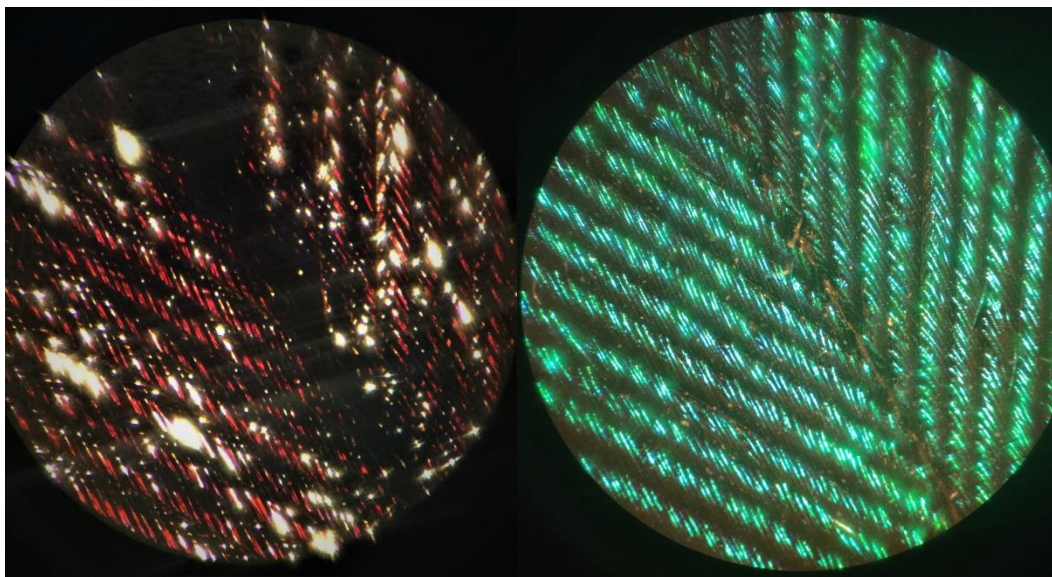




Εικόνα 9: Αντιπαράβολή του φτερού φωτισμένου μόνο από κάτω (αριστερά) και μόνο από πάνω (δεξιά) όπως φαίνεται μέσα από μικροσκόπιο.

Το ίδιο συνέβη και στο στερεοσκόπιο (βλ. Εικόνα 10) όπου όταν προσθέσαμε πάλι φως απευθείας στην πάνω επιφάνεια του φτερού, επανήλθε η γαλαζοπράσινη απόχρωση που είχε αρχικά. Παρότι δεν καταφέραμε να διακρίνουμε ακριβώς τις μικροσκοπικές δομές που οδηγούσαν σε αυτό το αποτέλεσμα αντλήσαμε σημαντικά συμπεράσματα για την φύση τους. Υποθέσαμε ότι κατά τον φωτισμό του φτερού από την κάτω μεριά όπου δεν υπήρχε ανάκλαση του φωτός και το φως διαπερνούσε το φτερό, για το καστανέρυθρο χρώμα που παρατηρήσαμε ευθύνονταν χρωστικές, συγκεκριμένα φαιομελανίνες που αντιστοιχούν στο χρώμα αυτό.





Εικόνα 10 : Αντιπαραβολή του φτερού φωτισμένου μόνο από κάτω (αριστερά) και μόνο από πάνω (δεξιά) όπως φαίνεται μέσα από στερεοσκόπιο.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

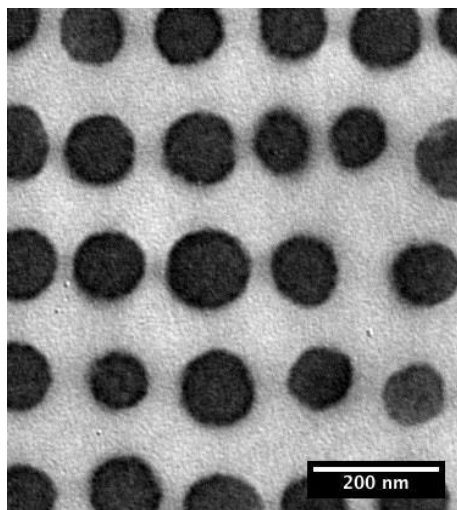
Τα συμπεράσματα μας μετά την μελέτη της βιβλιογραφίας και την χρήση των γνώσεων μας από την παρατήρηση και απαθανάτιση φτερών είναι τα εξής:

Αρχικά το χρώμα των άνω καλυπτήριων ουράς του παγωνιού προέρχεται κυρίως από την ύπαρξη ειδικών ανακλαστικών δομών και όχι από χρωστικές. Η εναλλασσόμενη πολυχρωμία του οφείλεται στο φαινόμενο του ιριδισμού το οποίο αποδίδεται τόσο στις δομές που υπάρχουν και παραποιούν το φως και στις χρωστικές του φτερού ,συγκεκριμένα μελανίνες από τις οποίες αποτελούνται οι δομές αυτές. Πιο συγκεκριμένα τα ιριδίζοντα χρώματα του φτερού καλυπτήριου ουράς του παγωνιού οφείλονται στην δισδιάστατη οργάνωση των μελανοσωμάτων σε ένα τετράγωνο πλέγμα το οποίο καλύπτεται από μία κερατινοειδής μεμβράνη (βλ. εικόνα 11). Η μέση διάμετρος ενός μελανοσώματος είναι 105nm και η μέση απόσταση 179nm, ενώ το μέσο πάχος της κερατινοειδούς μεμβράνης είναι 119nm. Τέλος κάθε συστοιχία περιέχει 9 μελανοσώματα. Καθοριστικοί παράγοντες στην φωτεινότητα του φτερού είναι η διάμετρος των μελανοσωμάτων και η μεταξύ τους απόσταση. Όταν η διάμετρος των





μελανοσωματων είναι μεγαλύτερη τότε είναι και πιο έντονη η φωτεινότητα. Αντιστοίχως όσο μεγαλύτερη είναι η μεταξύ τους απόσταση τόσο μικρότερη είναι η ένταση της φωτεινότητας (Chance Mitan 2015). Επιπλέον η διάμετρος των μελανοσωμάτων είναι καθοριστικός παράγοντας στην ένταση του φαινομένου του ιριδισμού που παρατηρούμε. Συμπεραίνουμε λοιπόν, πως η αρχική μας υπόθεση ήταν σωστή και λανθασμένη, σωστή από τη άποψη ότι το χρώμα του φτερού του παγωνιού οφείλεται σε δομές οι οποίες αλληλεπιδρούν με το φως (όπως συμπεράναμε από τα πειράματά μας) και λανθασμένη καθώς υποθέσαμε την αποκλειστικότητα των δομών αυτών απορρίπτοντας της χρωστικές, ενώ στο άνω καλυπτήριο ουράς απαντώνται και είναι απαραίτητες για την δημιουργία του δομικού χρωματισμού και οι δύο (πληροφορία που επίσης αντλήθηκε από την διεξαγωγή των πειραμάτων).



Εικόνα 11: Οργάνωση των μελανοσωμάτων σε τετράγωνο πλέγμα στο καλυπτήριο ουράς παγωνιού όπως φαίνεται με το μικροσκόπιο.

ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

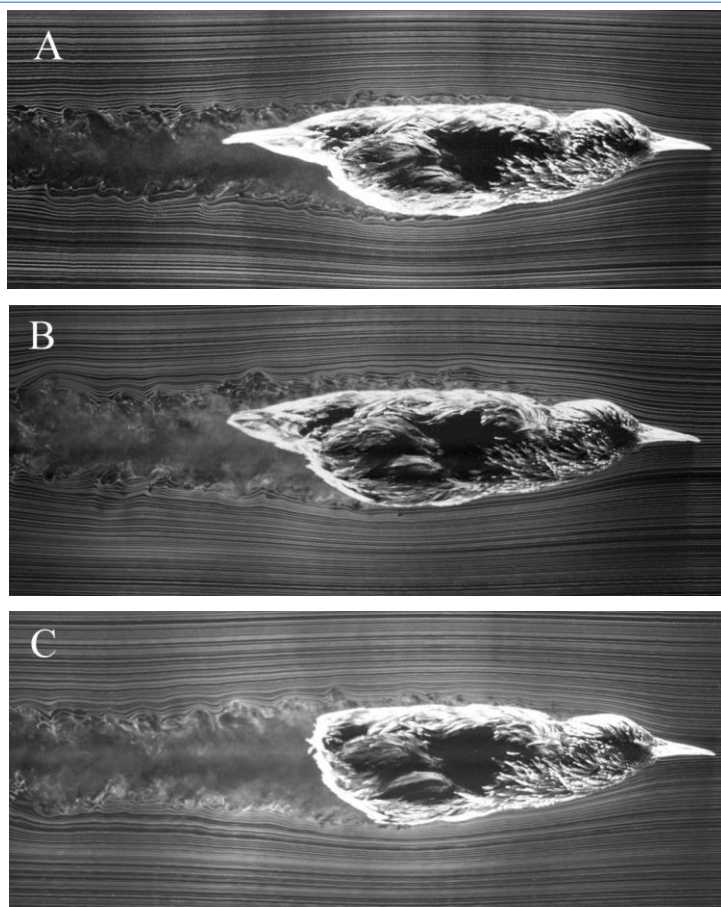
Στα περισσότερα πτηνά όπου η πτήση αποτελεί σημαντική πτυχή της επιβίωσης τους, η ουρά τους, αποτελούμενη από τα άνω και κάτω καλυπτήρια ουράς και τα πηδαλιώδη, παρόλο που δημιουργεί κάποια οπισθέλκουσα δύναμη είναι δομημένη με τέτοιο τρόπο που σε συνάρτηση





με την υπόλοιπη ανατομία του πτηνού του προσφέρει άντωση και εν τέλει το βοηθούν κατά την πτήση (βλ. εικόνα 12), (Maybury James William 2000). Η ουρά του αρσενικού παγωνιού η οποία έχει σοβαρή απόκλιση από το ιδανικό για την πτήση μοντέλο, όχι μόνο δεν του προσφέρει ευεργετικές για την πτήση δυνάμεις αλλά τουναντίον αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα. Βέβαια η ουρά του αρσενικού παγωνιού το βοηθάει στην ανεύρεση ταιριού καθώς τα θηλυκά προτιμούν αρσενικά με πιο περίτεχνες ουρές με περισσότερους «οφθαλμούς», (Petrie et al. 1991). Άλλος παράγοντας ο οποίος πιθανώς να αποτελεί κριτήριο επιλογής ταιριού για τα θηλυκά παγώνια όμως αποτελεί δυσχέρεια για τα αρσενικά είναι ο τρόπος οργάνωσης των μελανοσωμάτων στα ιριδίζοντα φτερά. Συγκεκριμένα, η οργάνωση σε τετράγωνο πλέγμα των μελανοσωμάτων δεν αποτελεί παρά έναν εκ των πολλών τρόπων παραγωγής του ιριδισμού (Chance Mitan 2015). Για παράδειγμα, σε πολλές πάπιες που έχουν ιριδίζοντα φτερά, τα μελανοσώματα είναι οργανωμένα σε εξαγωνικό πλέγμα το οποίο αποτελεί δομή με υψηλή σταθερότητα και μειωμένο ενεργειακό κόστος. Εύλογο λοιπόν παρουσιάζεται το ερώτημα του γιατί τα παγώνια έχουν μια μελανοσωμική οργάνωση η οποία να είναι πιο ενεργειοβόρα. Πιθανολογείται πως αποτελεί δείγμα ευρωστίας των αρσενικών παγωνιών, όμως απαιτείται περαιτέρω έρευνα για εξακρίβωση των πληροφοριών. Καταλήγουμε λοιπόν σε ένα γενικό συμπέρασμα ότι τα αρσενικά παγώνια μειονεκτούν στην επιβίωση ώστε να 'έχουν αυξημένες πιθανότητες εύρεσης ταιριού. Τα θεματικό κέντρο αυτό είναι ασαφώς έτσι ορισμένο καθώς είναι πολλοί παράγοντες που πρέπει να μελετηθούν ώστε να διασαφηνιστεί και συνεπώς προσφέρει πληθώρα θεματολογίας για μελλοντικές διερωτήσεις και έρευνες.





Εικόνα 12: Στην εικόνα παρουσιάζονται οι στρόβιλοι της οπισθέλκουσας δύναμης γύρω από ένα Ψαρόνι (*Sturnus vulgaris*) σε σήραγγα αεροδυναμικής. Στην εικόνα Α το Ψαρόνι έχει τη πλήρη ουρά του και παρουσιάζονται οι λιγότεροι στρόβιλοι. Στην εικόνα Β του έχουν αφαιρεθεί τα πηδαλιώδη και στην εικόνα C του έχει αφαιρεθεί ολόκληρη η ουρά οπότε παρατηρούνται και οι περισσότεροι στρόβιλοι.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες στους καθηγητές μας ,Γιασεμή Ηλία και Καλογεράκο Πέτρο, χωρίς την παρακίνηση των οποίων δεν θα είχαμε ξεκινήσει το εγχείρημα συγγραφής της εργασίας αυτής και χωρίς την συνεχή υποστήριξη τόσο σε πρακτικό επίπεδο όσο και σε νοητικό δεν θα είχαμε καταφέρει να την τελεσφορήσουμε .Τις θερμές μας ευχαριστίες μας θα θέλαμε





να εκφράσουμε και στον Δρ. Παύλο Ανδριόπουλο του οποίου η καθοδήγηση στην οργάνωση της εργασίας καθώς και η προσφορά σε βιβλιογραφικό υλικό ήταν καθοριστική στην τελική διαμόρφωση της εργασίας μας .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] Phillip Allan Publishers, 1988, Natural Photonics Iridescence in Lepidoptera

<https://web.archive.org/web/20140407082122/http://emps.exeter.ac.uk/physics-astronomy/research/emag/themes/natural-photonics/iridescenceinlepidoptera/>

[2] Joseph T. Bagnara, Philip J. Fernandez, Royozo Fujii, 2007, On the blue coloration of vertebrates, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1600-0749.2006.00360.x>

[3] Richard H. C. Bonser, 1995, Melanin and the abrasion resistance of feathers. Condor 97:590–591 <https://sora.unm.edu/sites/default/files/journals/condor/v097n02/p0590-p0591.pdf>

[4] Frank B. Gill, 2007, Ornithology, Εκδότης: W. H. Freeman, σελ.94-109,189-190

[5] Matthew D. Shawkey, Geoffrey E. Hill, 2005, Carotenoids need structural colours to shine, <https://web.archive.org/web/20090326144121/http://nature.berkeley.edu/~mshawkey/9.pdf>

[6] Maybury William James, 2000, The Aerodynamics of Bird Bodies

https://www.researchgate.net/publication/34504660_The_aerodynamics_of_bird_bodies/download

[7] Mitan, Chance, "What Causes Variation in Peacock Feather Colors ?" (2015). *Honors Research Projects*. 160. http://ideaexchange.uakron.edu/honors_research_projects/160

[8] Petrie, M., Halliday, T. and Sanders, 1991, Animal Behaviour, Peahens prefer peacocks with more elaborate trains., ,σελ. 41, 323-331.

