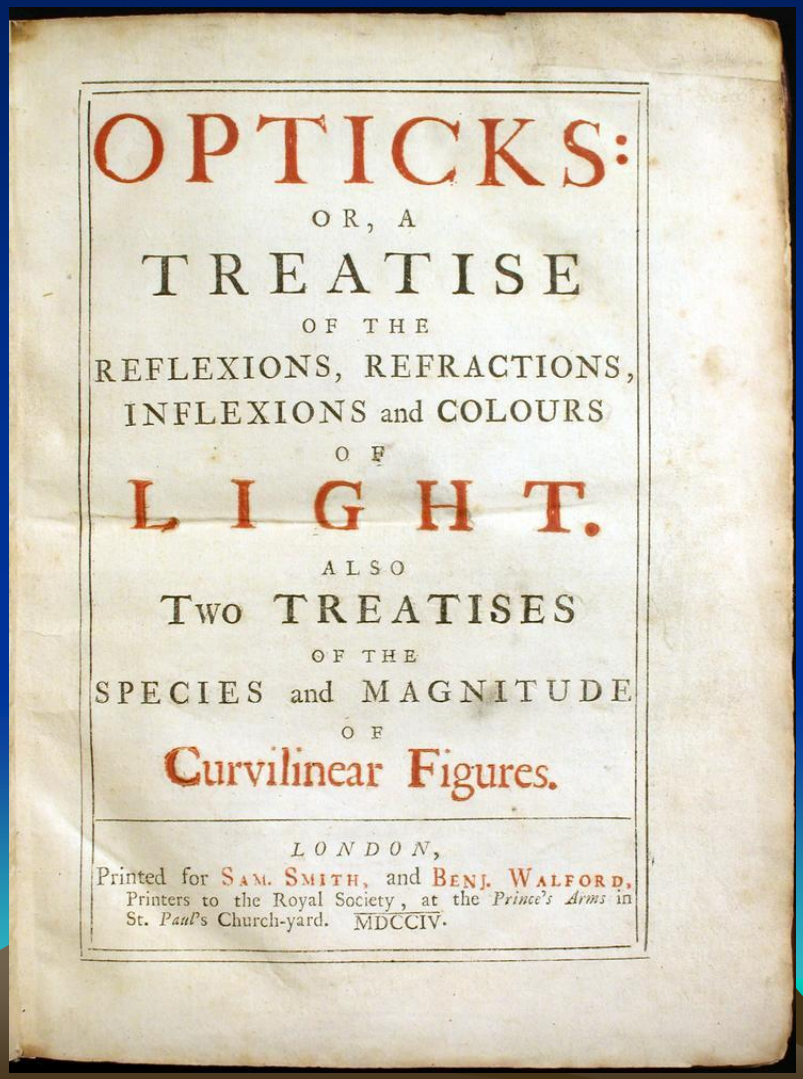
Οπτική

Χάρης Βάρβογλης
Τμήμα Φυσικής
Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Μέχρι την Αναγέννηση

- Τα (επίπεδα) κάτοπτρα ήταν γνωστά στους Φαραώ.
- Τα κοίλα κάτοπτρα ήταν γνωστά στον Αρχιμήδη.
- Ο Νέρων (σύμφωνα με μια παράδοση!) χρησιμοποιούσε ένα λειασμένο σμαράγδι ως οπτικό βοήθημα.
- Ο Σενέκας είχε περιγράψει τη μεγέθυνση ενός σώματος από μια φιάλη γεμάτη νερό.
- Ο Κλαύδιος Πτολεμαίος είχε ανακαλύψει την διάθλαση και είχε μετρήσει τις σχετικές γωνίες.
- Η χρήση των διορθωτικών φακών συζητήθηκε από τον Άγγλο μοναχό Roger Bacon το 1266, ως αποτέλεσμα των μελετών του για τους συγκλίνοντες φακούς.

Νεύτωνας
Opticks, πρώτη έκδοση 1704



OPTICKS:

OR, A

TREATISE

OF THE

REFLEXIONS, REFRACTIONS,
INFLEXIONS and COLOURS

OF

LIGHT.

ALSO

Two TREATISES

OF THE

SPECIES and MAGNITUDE

OF

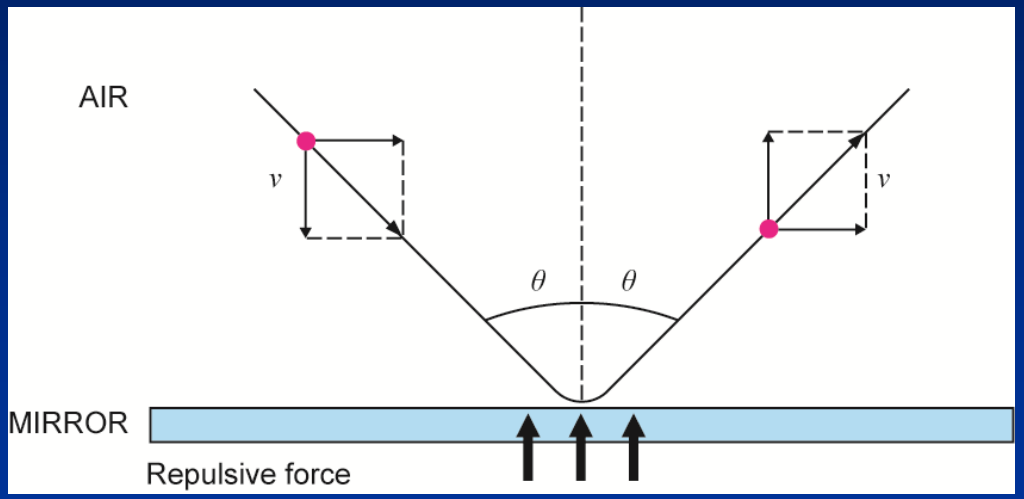
Curvilinear Figures.

LONDON,

Printed for SAM. SMITH, and BENJ. WALFORD,
Printers to the Royal Society, at the *Prince's Arms* in
St. *Paul's* Church-yard. MDCCIV.

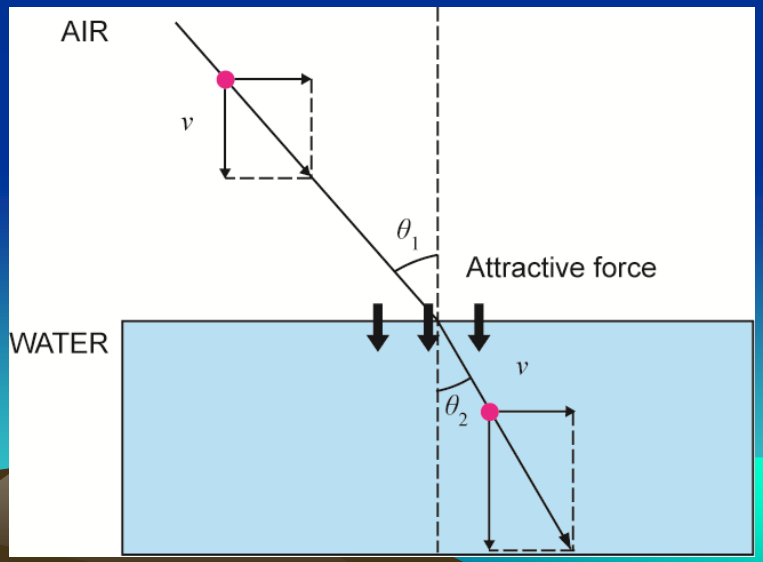
Ανάλυση του φωτός από πρίσμα

Ερμηνεία της ανάκλασης και διάθλασης του φωτός από τον Νεύτωνα



Στην ανάκλαση το «κάτοπτρο» εξασκεί μια απωστική δύναμη στα σωματίδια του φωτός. Το μέτρο της ταχύτητάς τους παραμένει σταθερό.

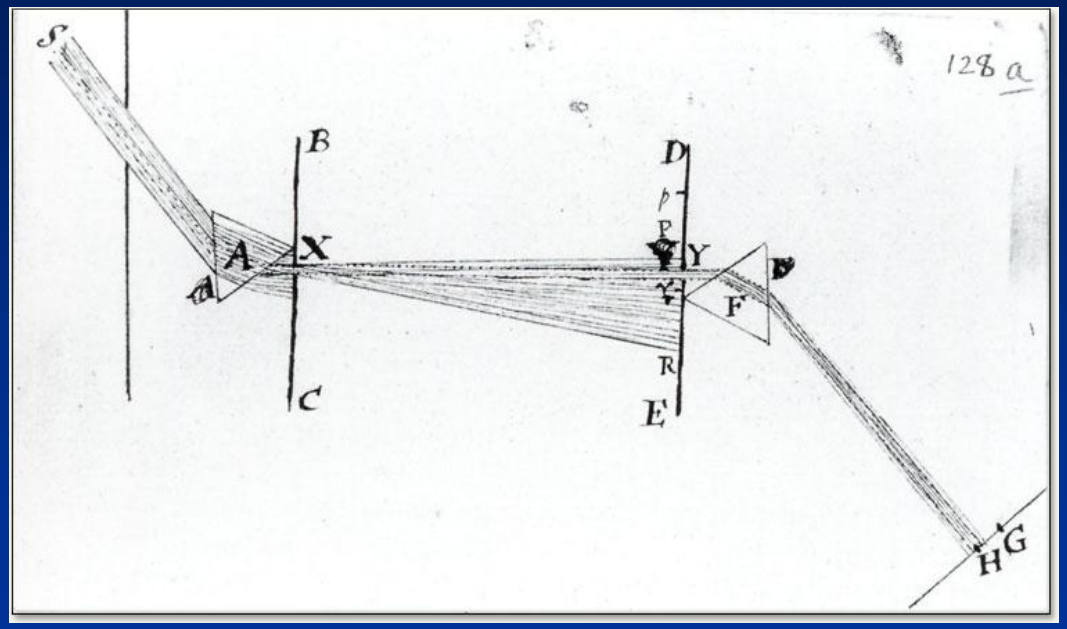
Στη διάθλαση το πυκνότερο μέσο εξασκεί μια ελκτική δύναμη στα σωματίδια του φωτός. Το μέτρο της ταχύτητάς τους είναι *μεγαλύτερο* στο *πυκνότερο* μέσο.



Ερμηνεία των χρωμάτων από τον Νεύτωνα

- Το λευκό φως αποτελείται από διάφορα «βασικά» χρώματα.
- Κάθε χρώμα «δημιουργείται» από σωματίδια διαφορετικής μάζας.
- Όταν τα σωματίδια του φωτός κινούνται από ένα μέσο σε ένα άλλο, έλκονται με διαφορετική βαρυτική δύναμη, λόγω των διαφορετικών μαζών τους.
- Με αυτόν τον τρόπο η κάθετη, στην διεπιφάνεια μεταξύ των δύο μέσων, συνιστώσα της ταχύτητας μεταβάλλεται κατά μια διαφορετική ποσότητα για κάθε χρώμα και, επομένως το ίδιο συμβαίνει με τη γωνία διάθλασης.
- Έτσι ερμηνεύεται ο νόμος της διάθλασης του Snell.
- Η ανασύνθεση του λευκού φωτός μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα αντίστροφο πρίσμα (προσοχή στη συμμετρία!) ή με τον δίσκο του Νεύτωνα.

«Επαλήθευση» της θεωρίας του φωτός του Νεύτωνα



- Ο δίσκος έχει τα 7 χρώματα της Ίριδας. Αν περιστραφεί γρήγορα, φαίνεται λευκός.

- Φως που έχει αναλυθεί από πρίσμα δεν είναι δυνατό να αναλυθεί περαιτέρω.
- Πρωτότυπο σχήμα από το βιβλίο *Opticks*

Τηλεσκόπιο του Νεύτωνα

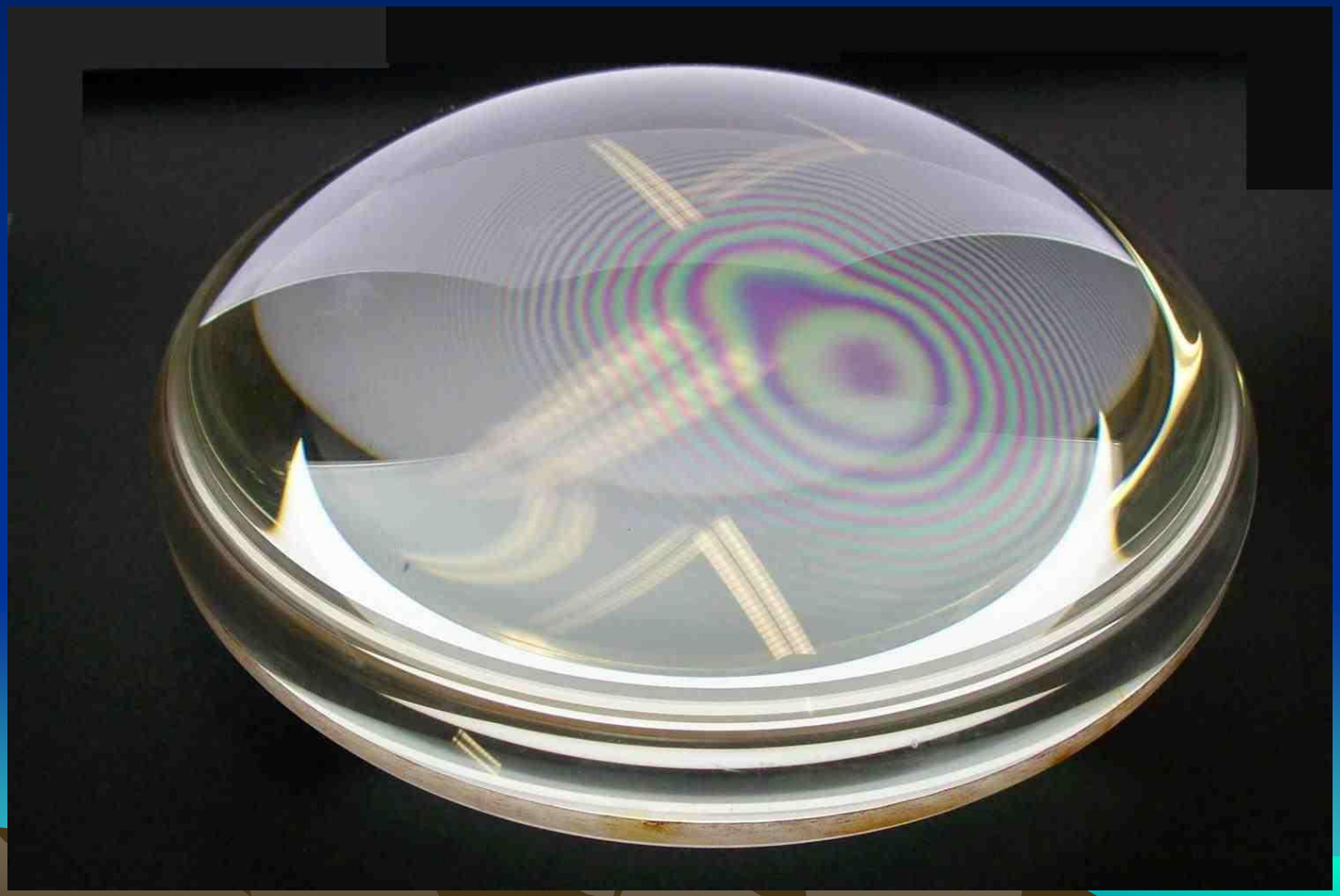
Επειδή ένας συγκλίνων φακός είναι ένα είδος καμπύλου πρίσματος, ο Νεύτωνας συμπέρανε ότι θα εισάγει *πάντοτε* χρωματικό σφάλμα. Δηλαδή, θα αναλύει το λευκό φως, δημιουργώντας ξεχωριστές εικόνες (μία για κάθε χρώμα) του παρατηρούμενου ουράνιου σώματος. Το τελικό αποτέλεσμα θα είναι μία «θολή» εικόνα.

Γι' αυτόν τον λόγο σκέφθηκε να χρησιμοποιήσει κάτοπτρα, και έτσι κατασκεύασε το πρώτο κατοπτρικό τηλεσκόπιο.

Σήμερα γνωρίζουμε ότι το χρωματικό σφάλμα είναι δυνατό να διορθωθεί με τη χρήση *σύνθετων φακών*.

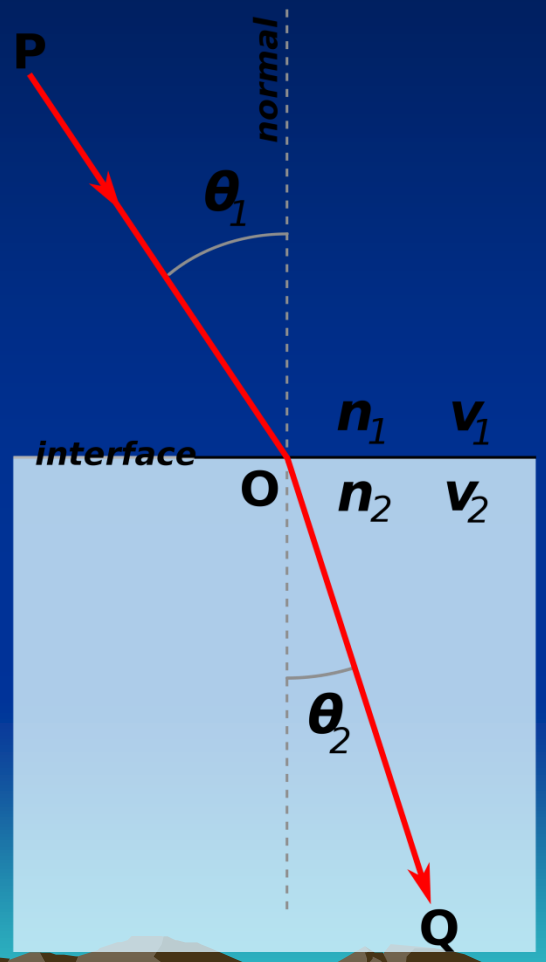
Όμως όλα τα μεγάλα τηλεσκόπια είναι κατοπτρικά, επειδή τα ισοδύναμα διαθλαστικά είναι πιο βαριά (και επομένως δυσκολότερο να στηριχθούν και πιο ευαίσθητα στη θραύση) και επηρεάζονται από τις ατέλειες του γυαλιού (π.χ. εγκλείσματα).

Δακτύλιοι του Νεύτωνα



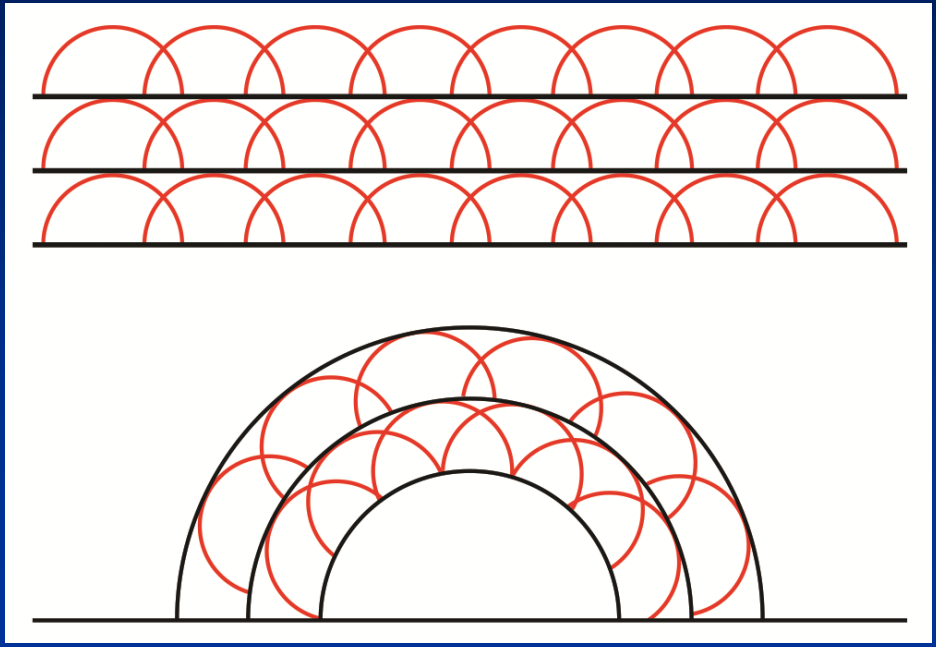
Χρώση λεπτών υμενίων

Η αρχή του Fermat
για τη διάδοση του φωτός



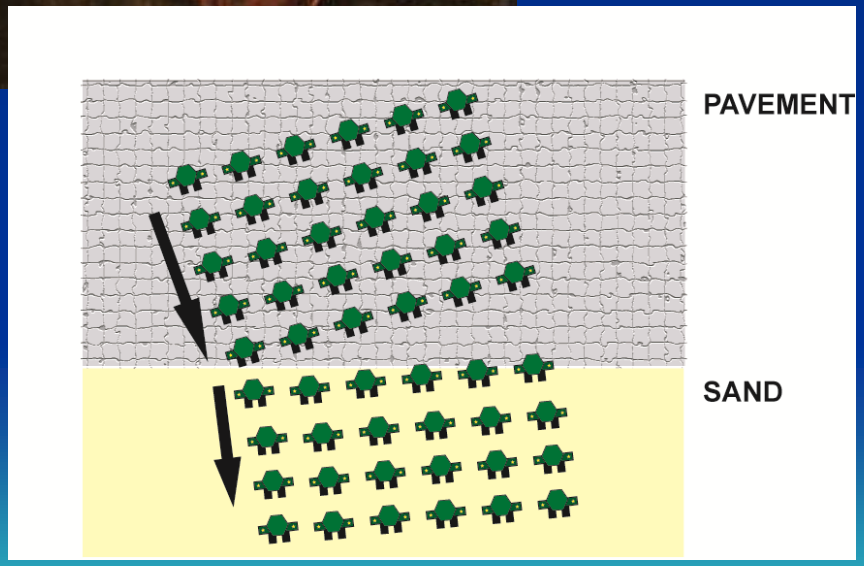
- Προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Ήρωνα τον Αλεξανδρέα (60 μ.Χ.)
- Ibn al Haitham (1021)
- Νόμος του Snell (1621, αλλά αδημοσίευτος)
- Pierre de Fermat (1662)

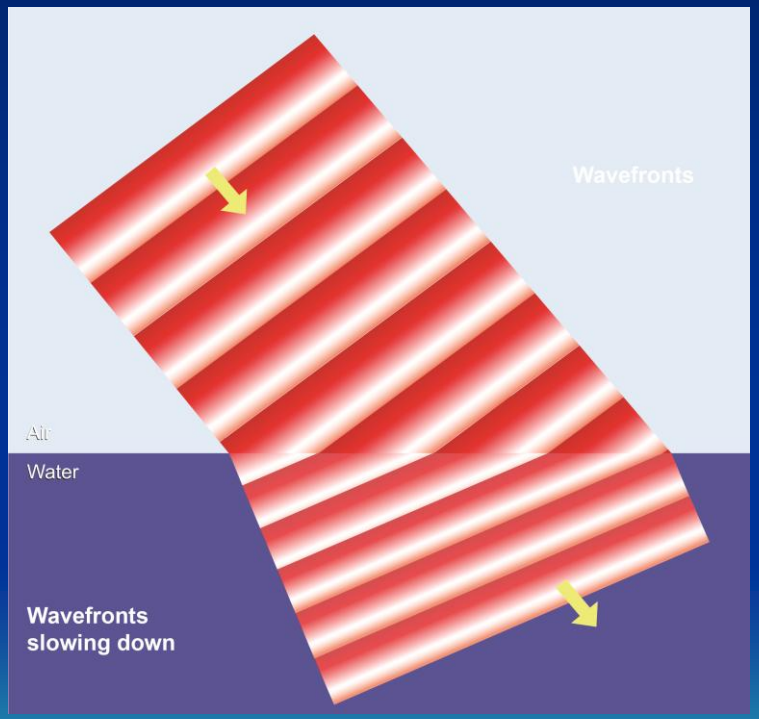
Αρχή της δευτερογενούς εκπομπής του Huygens



- Κάθε σημείο, από το οποίο διέρχεται ένα κύμα, γίνεται κέντρο δευτερογενούς εκπομπής.
- Μπορεί να αποδειχθεί ότι η περιβάλλουσα των δευτερογενών κυμάτων διατηρεί τα χαρακτηριστικά του αρχικού κύματος.
  - Είναι επίπεδη, αν το αρχικό κύμα είναι επίπεδο.
  - Είναι σφαιρική, αν το αρχικό κύμα είναι σφαιρικό.

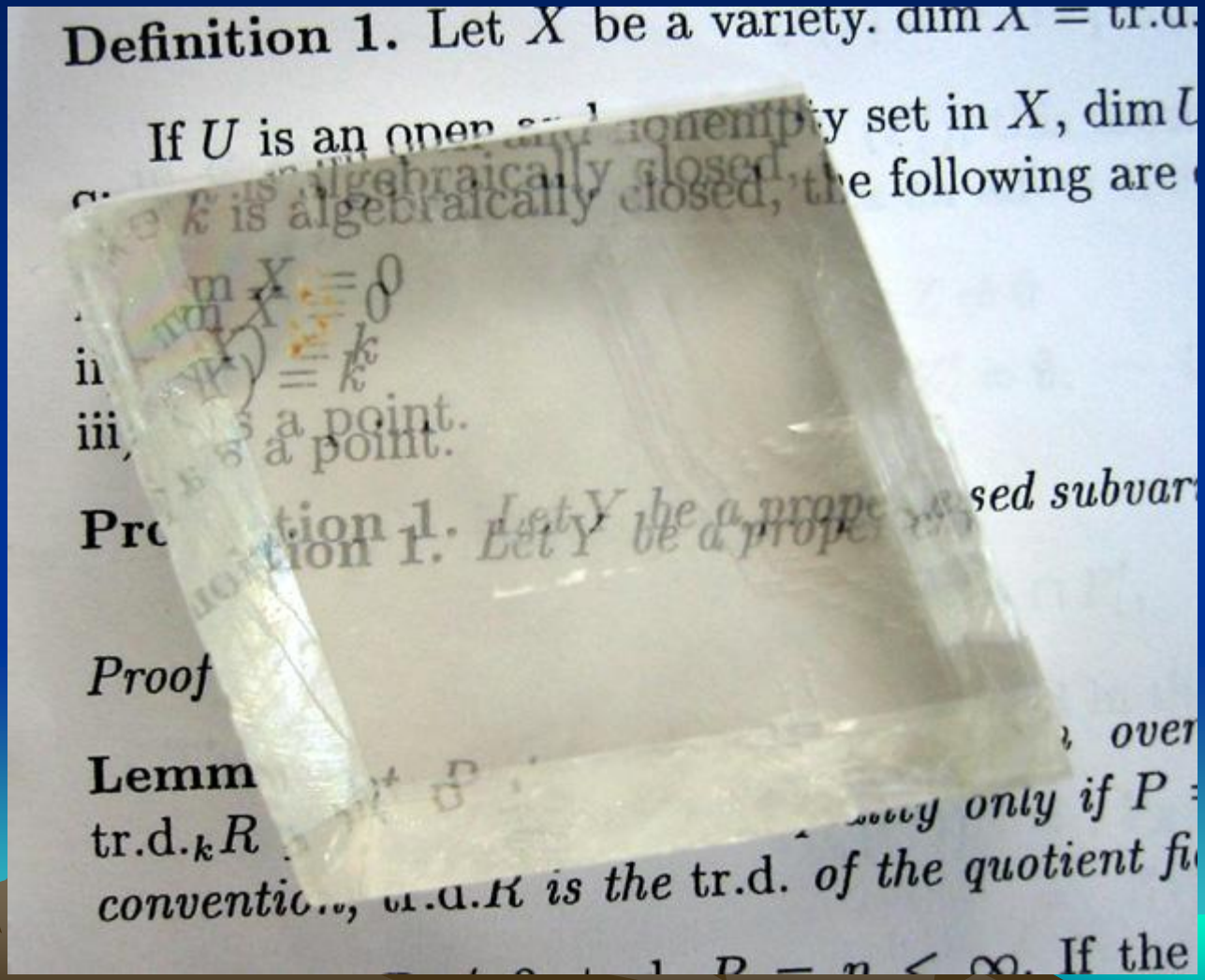
Διάθλαση σύμφωνα με την αρχή του Christiaan Huygens



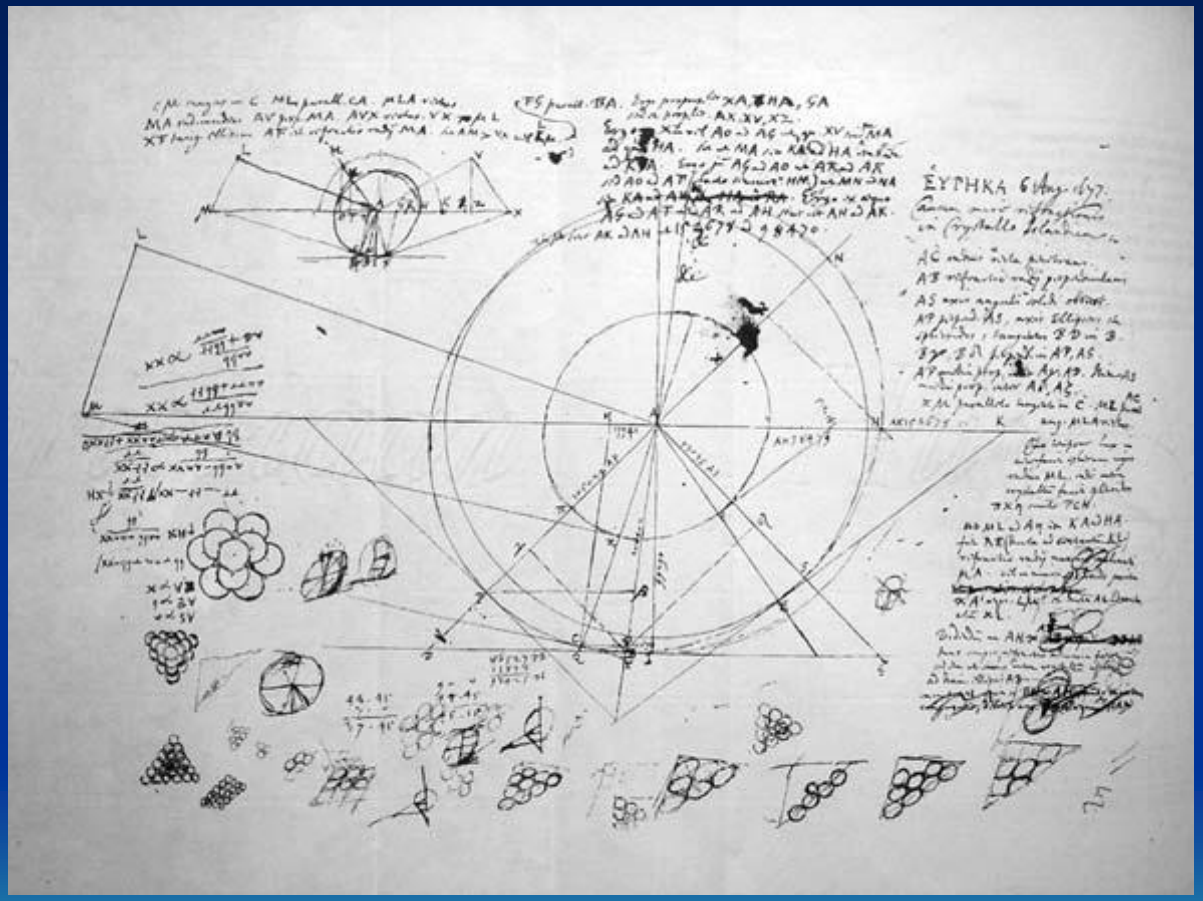


Η ταχύτητα του φωτός στο *πυκνότερο* μέσο είναι *μικρότερη* από ό,τι στο αραιότερο.

Διπλή διάθλαση από ασβεστίτη ($CaCO_3$)



Ερμηνεία από τον Huygens: ΕΥΡΗΚΑ!

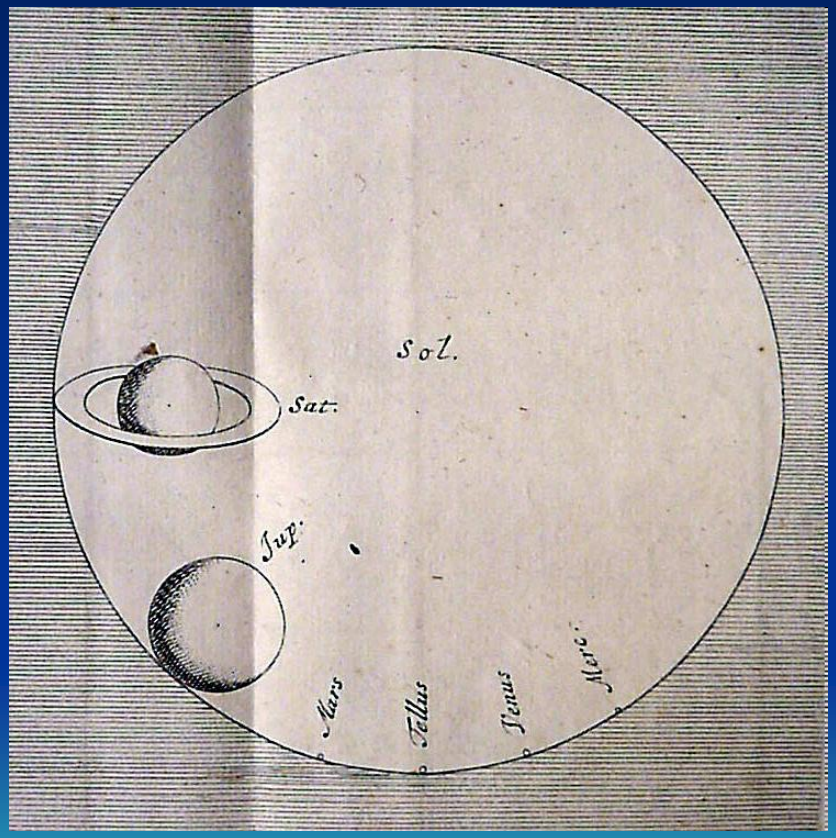


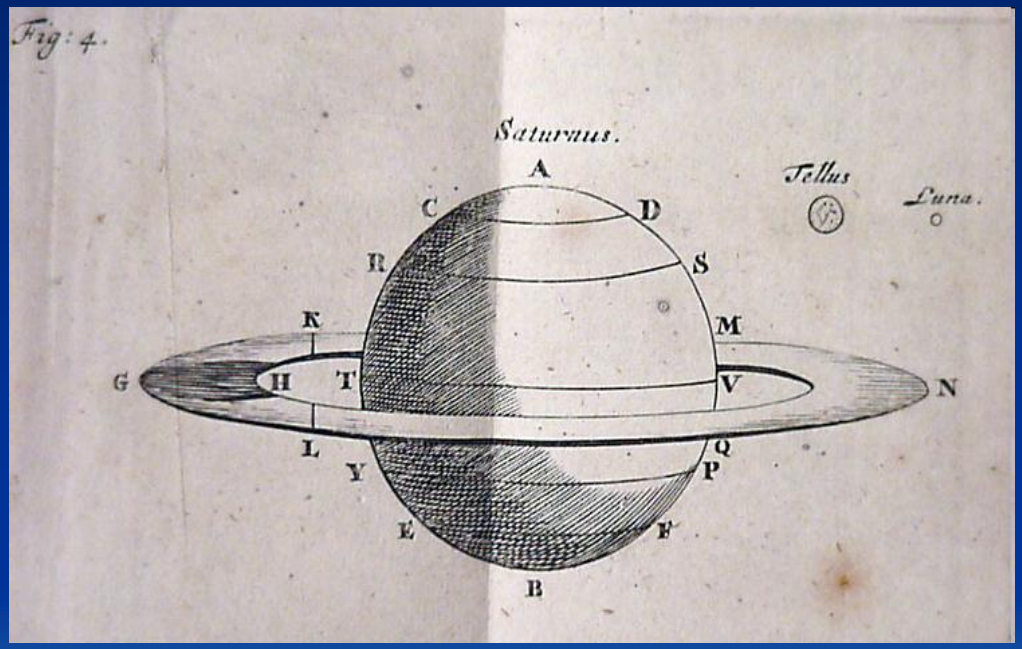
6 Αυγούστου 1677: Ο Huygens μπόρεσε να ερμηνεύσει τη διπλή διάθλαση, κάνοντας την υπόθεση ότι στον ασβεστίτη οι περιβάλλουσες των φωτεινών κυμάτων είναι *ελλειψοειδείς* και όχι σφαιρικές. Με αυτόν τον τρόπο ο συνολικός χρόνος διάδοσης μεταξύ δύο μέσων έχει *δύο ελάχιστα* και έτσι υπάρχουν *δύο φωτεινές ακτίνες* που εξέρχονται από τον κρύσταλλο.

Νεύτωνας “εναντίον” Huygens

- *Η σωματιδιακή θεωρία* του Νεύτωνα *μπορεί* να ερμηνεύσει:
  - Την διάδοση του φωτός, την ανάκλαση, τη διάθλαση και τα χρώματα.
- *Δεν μπορεί* να ερμηνεύσει:
  - Τη συμβολή και την πόλωση.
- *Η κυματική θεωρία* του Huygens *μπορεί* να ερμηνεύσει:
  - Την ανάκλαση, τη διάθλαση, τα χρώματα, τη συμβολή
- *Δεν μπορεί* να ερμηνεύσει:
  - Τη διάδοση του φωτός (κύματα σε ποιο μέσο;), και την πόλωση

Ο Huygens ως αστρονόμος

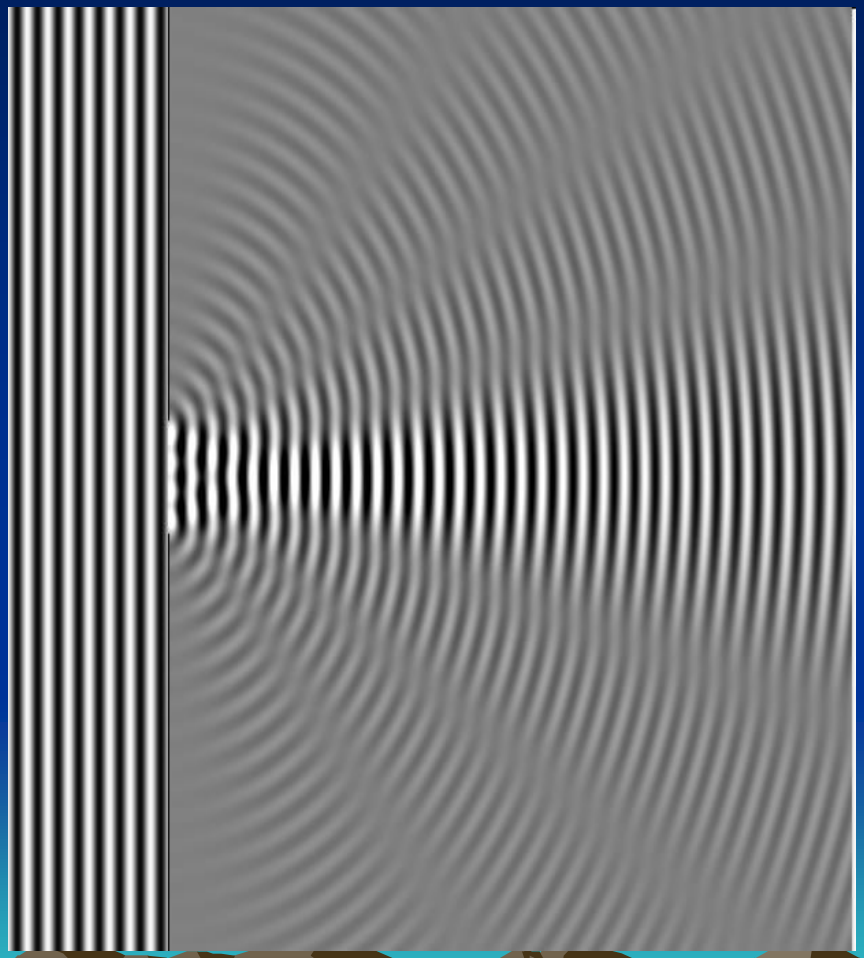


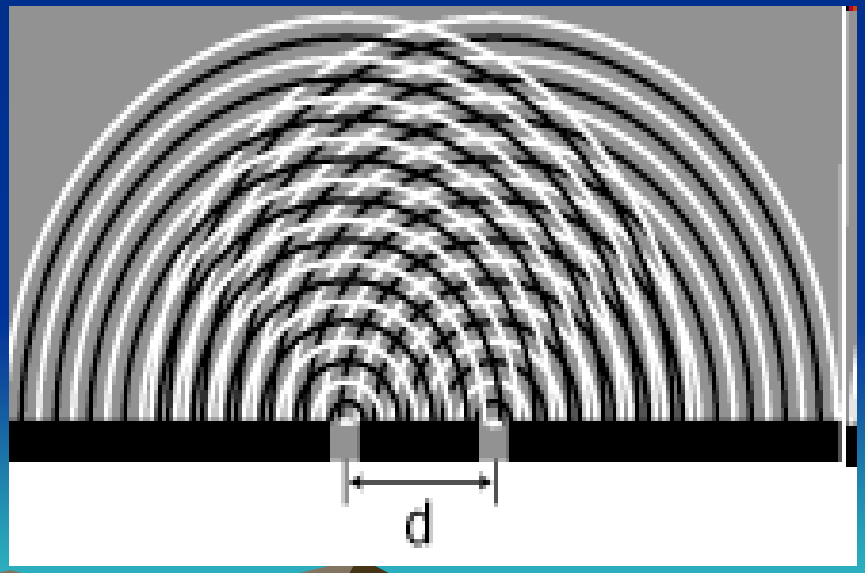


Thomas Young

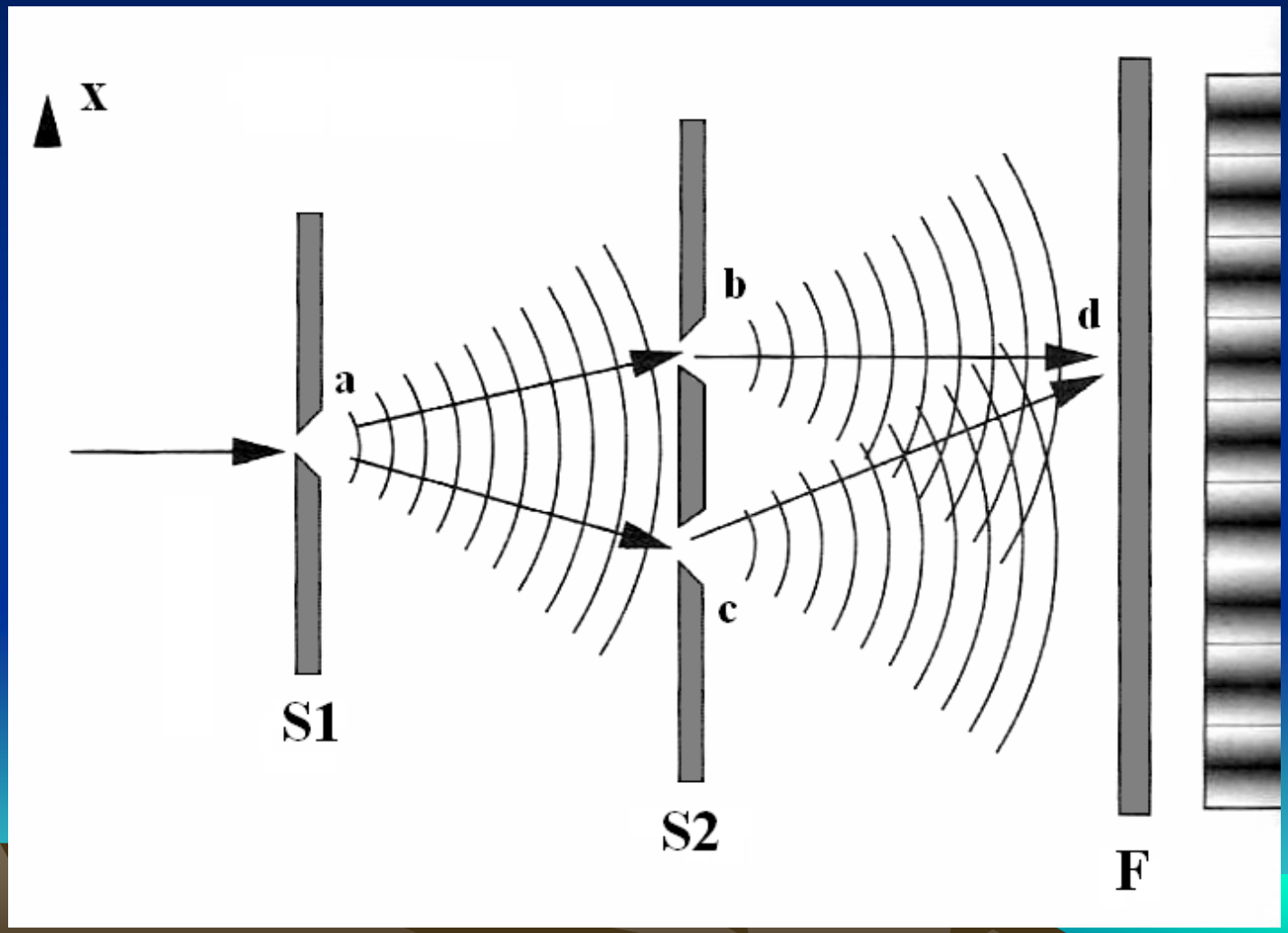
- 1773 – 1829
- Polymath (στα Αγγλικά!)
- Σπούδασε Ιατρική
- Άνοιξε ιατρείο στη Harley str.
- Δημοσίευε με ψευδώνυμο (για να προστατέψει το όνομά του ως γιατρού!)
- Κληρονόμησε τον θείο του
- 1801-1803: Καθηγητής Φυσικής Φιλοσοφίας (~Φυσικής) στο Βασιλικό Ίδρυμα (91 διαλέξεις)

Πείραμα των 2 σχισμών





Ερμηνεία του πειράματος των 2 σχισμών



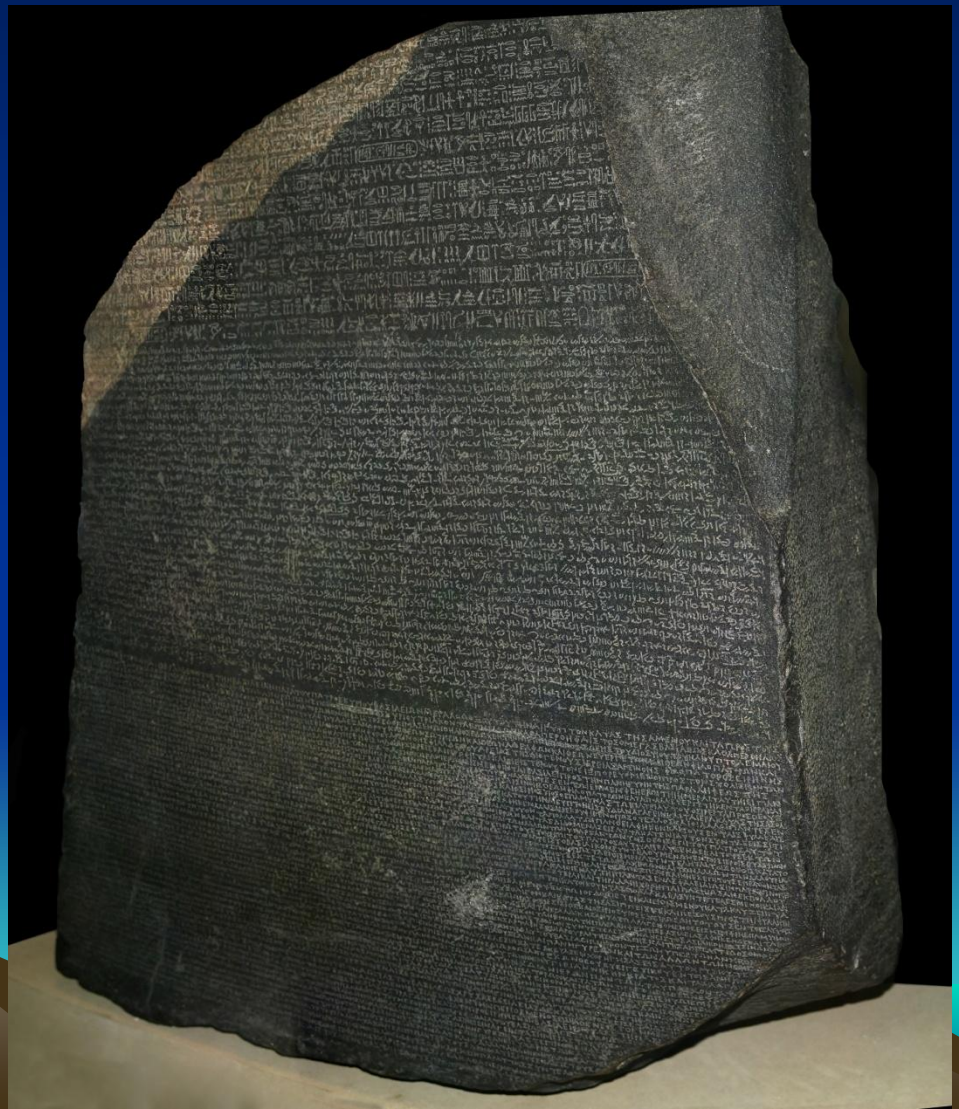
Ο Young στην Οπτική

- Ασχολήθηκε με την Οπτική μέσω της μελέτης της φυσιολογίας του οφθαλμού.
- Η αίσθηση των χρωμάτων, κατ' αυτόν, οφείλεται στο ότι ο οφθαλμός έχει 3 διαφορετικά είδη αισθητήριων κυττάρων, ευαίσθητα το καθένα στα 3 βασικά χρώματα: ερυθρό, κίτρινο και κυανό.
- Ανακάλυψε τη μεταβλητή εστίαση του ενδοφακού του οφθαλμού.
- Ο πρώτος που περιέγραψε τον αστιγματισμό.

Ο Young πέρα από την Οπτική

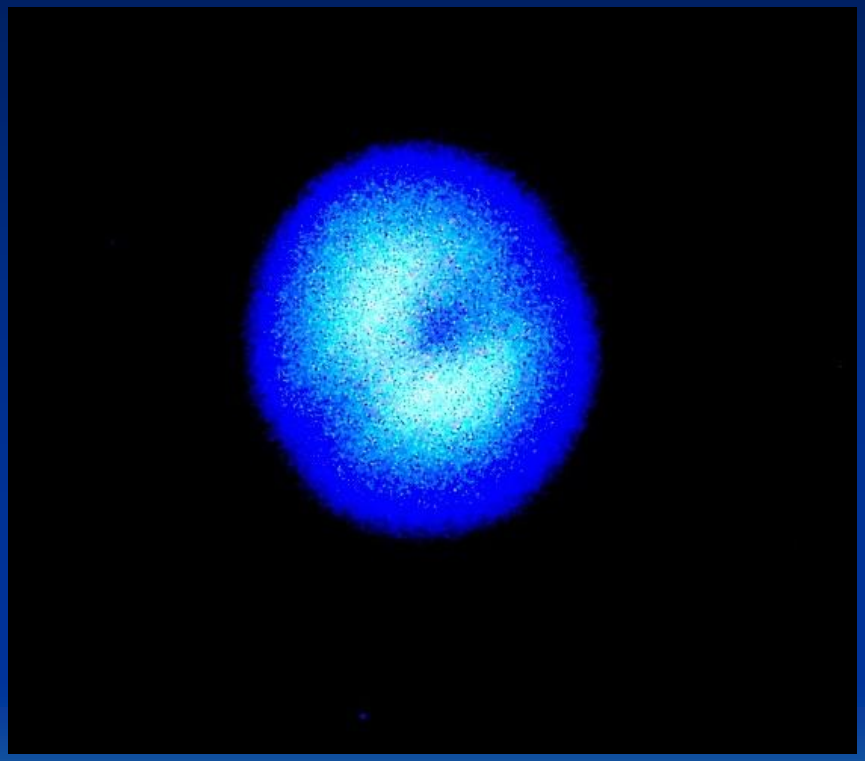
- Ο πρώτος που εισήγαγε τον όρο *ενέργεια*.
- Εισήγαγε το μέτρο Young (*Young modulus*) για να περιγράψει την ελαστικότητα των στερεών.
- Θεμελιωτής της θεωρίας των *τριχοειδών φαινομένων*.
- Στο λήμμα *γλώσσες* της Encyclopaedia Britannica συνέκρινε τη γραμματική και το λεξιλόγιο *400 γλωσσών*.
- Πρότεινε το «κλειδί» για την αποκρυπτογράφηση των ιερογλυφικών μέσω της *στήλης της Ροζέτας (Rosetta Stone)*.

Rosetta stone



Fresnel - I

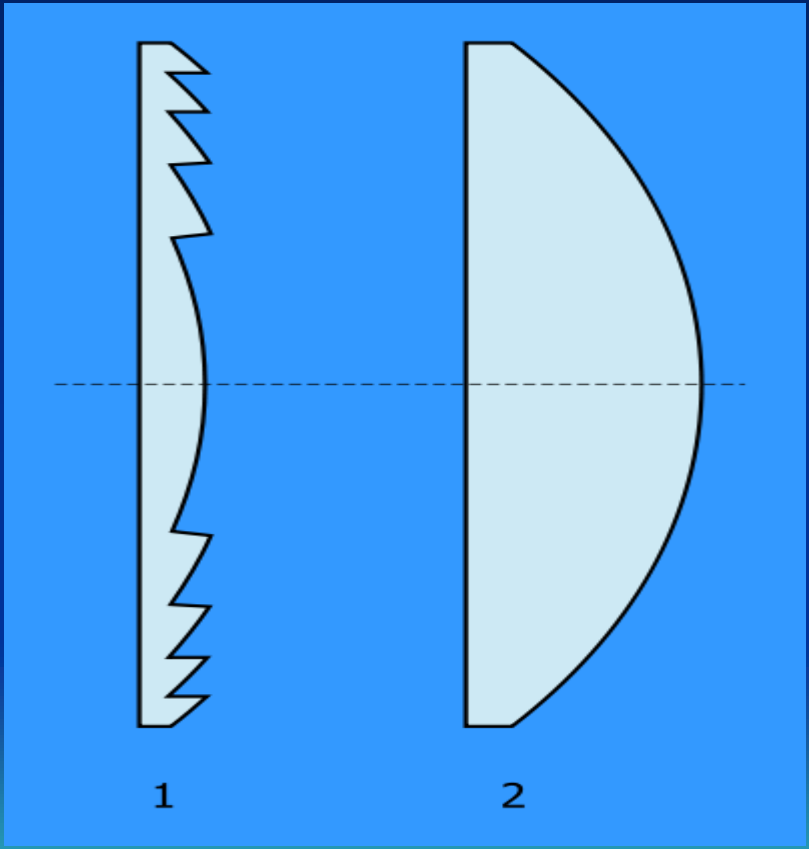
- Εργάσθηκε δύο φορές σε προβλήματα που ήταν ήδη λυμένα (περίθλαση από ημιεπίπεδο και χρώμα λεπτών υμενίων).
- Επισκέφθηκε τον Young, συνοδευόμενος από τον Arago, για να παρουσιάσει στον Young το έργο του.
- Έλυσε ένα τρίτο πρόβλημα, περίθλαση από κυκλικό δίσκο, προβλέποντας μια φωτεινή κηλίδα στο κέντρο της κυκλικής σκιάς.



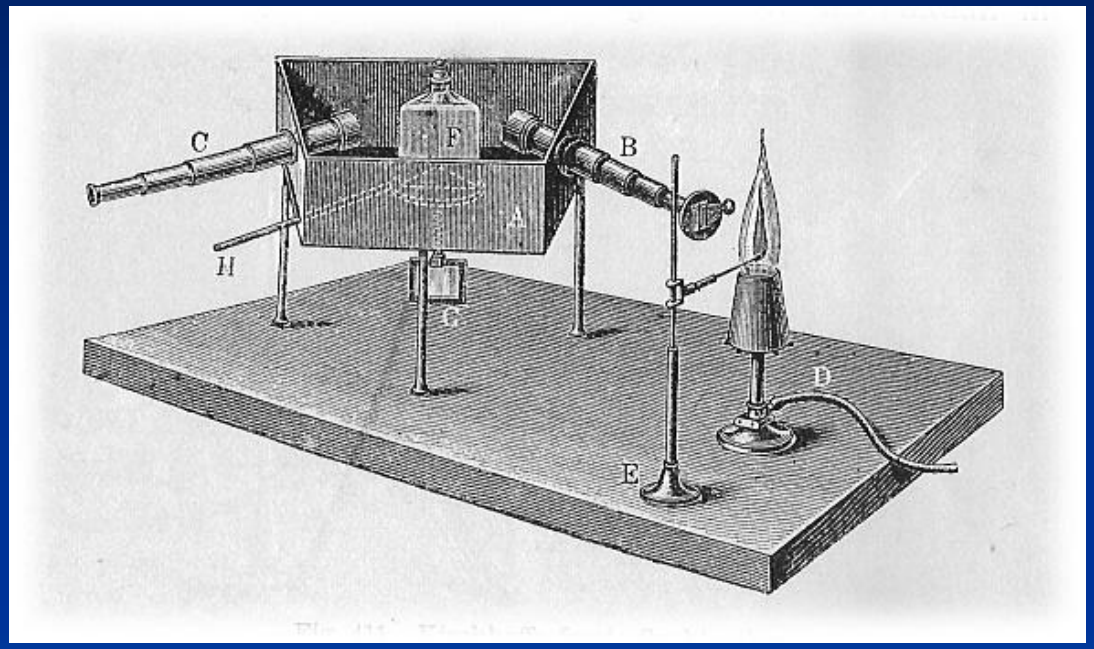
Η σκοτεινή κηλίδα στο κέντρο του φωτεινού δίσκου, στην αντίστοιχη περίπτωση της περίθλασης από κυκλική οπή.

Fresnel - II

- Ένας φακός Fresnel είναι λεπτότερος από έναν ισοδύναμο «κλασικό» συγκλίνοντα φακό ίσης εστιακής απόστασης.
- Χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στις λυχνίες των φάρων.
- Σήμερα στους προβολείς των αυτοκινήτων.



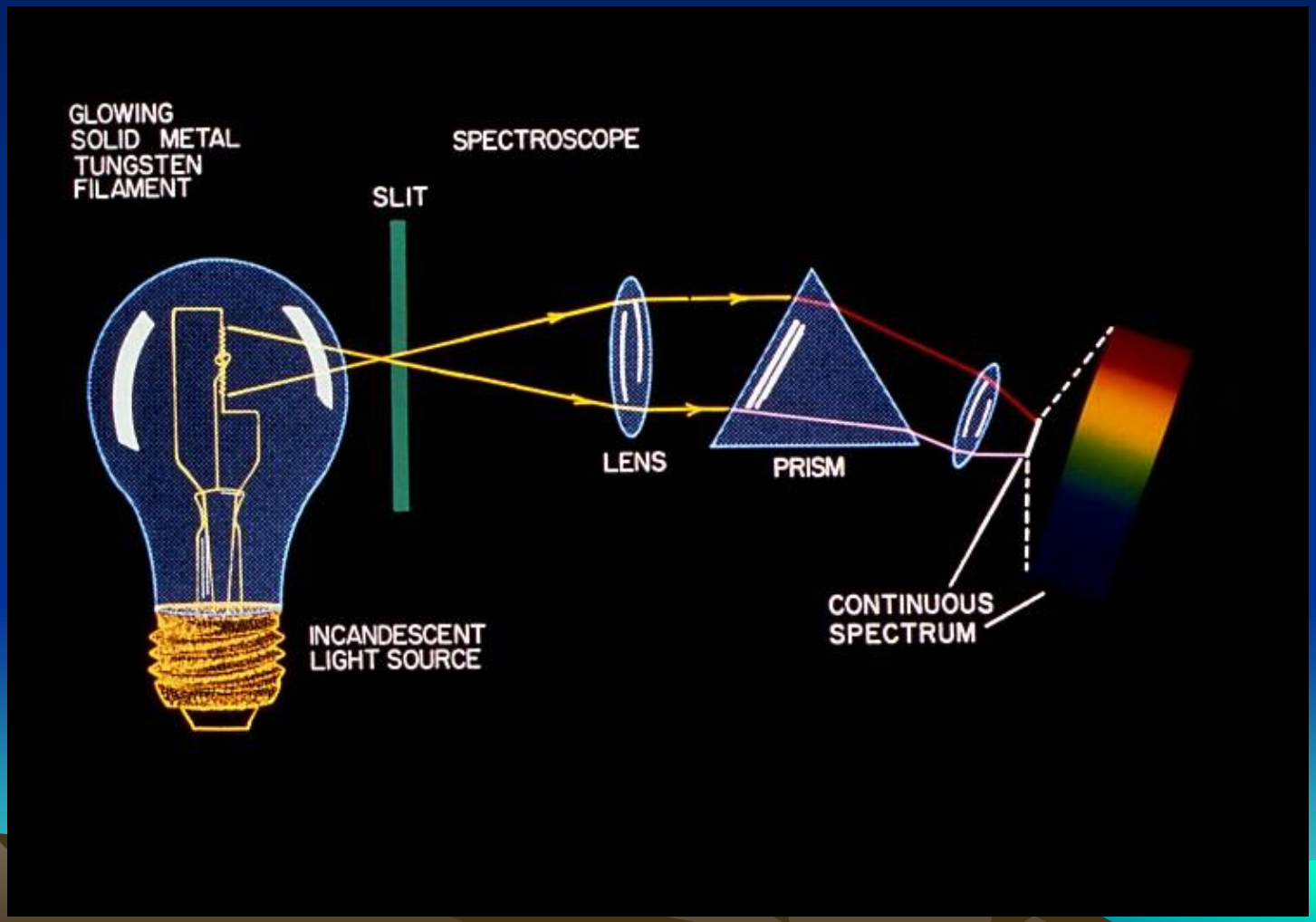
Η φασματοσκοπία ως κλάδος της Οπτικής



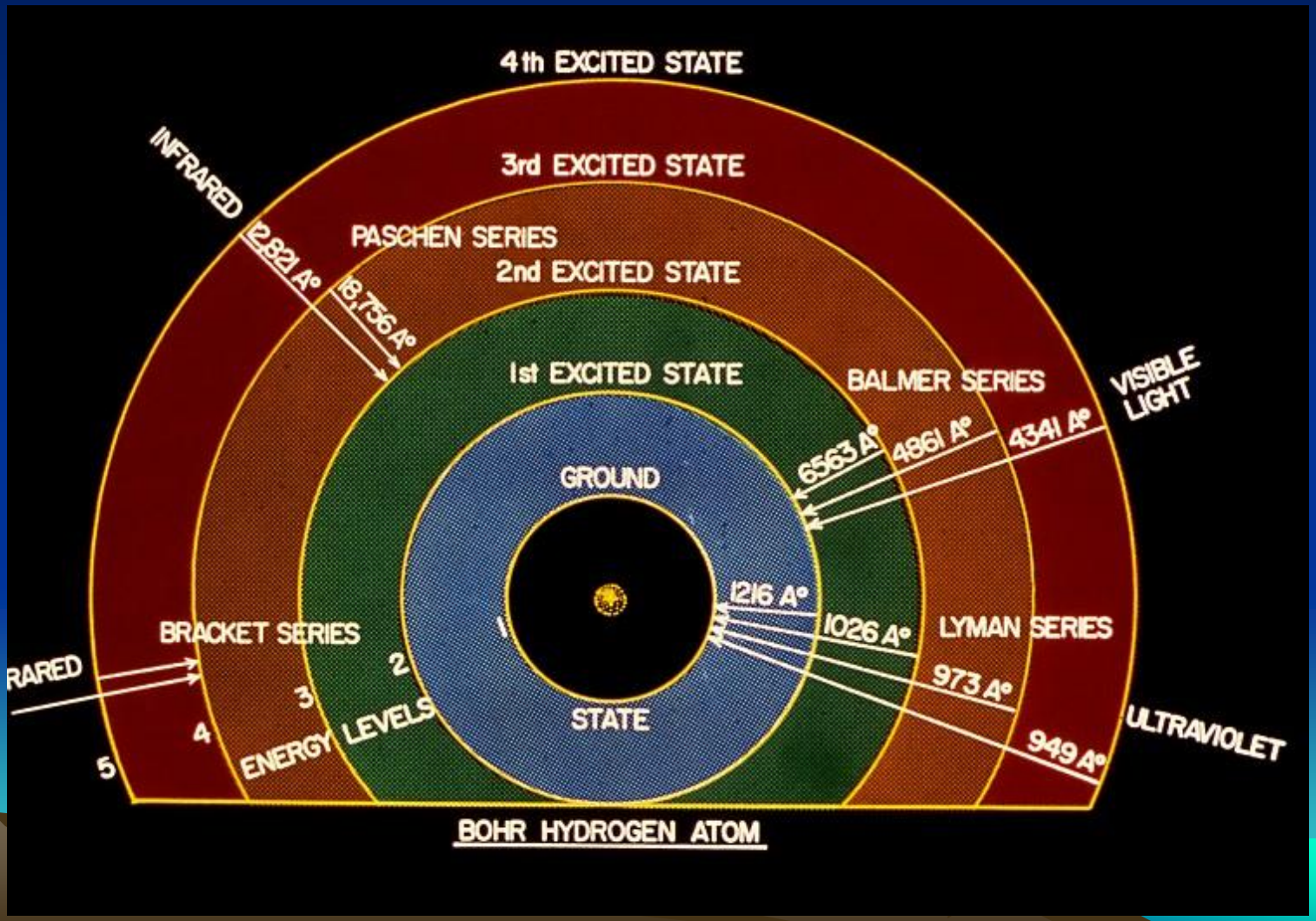
Ο πρώτος φασματογράφος, σχεδιασμένος από τους Bunsen-Kirchhoff

Gustav Kirchhoff (φυσικός, αριστερά)
Robert Bunsen (χημικός, δεξιά)

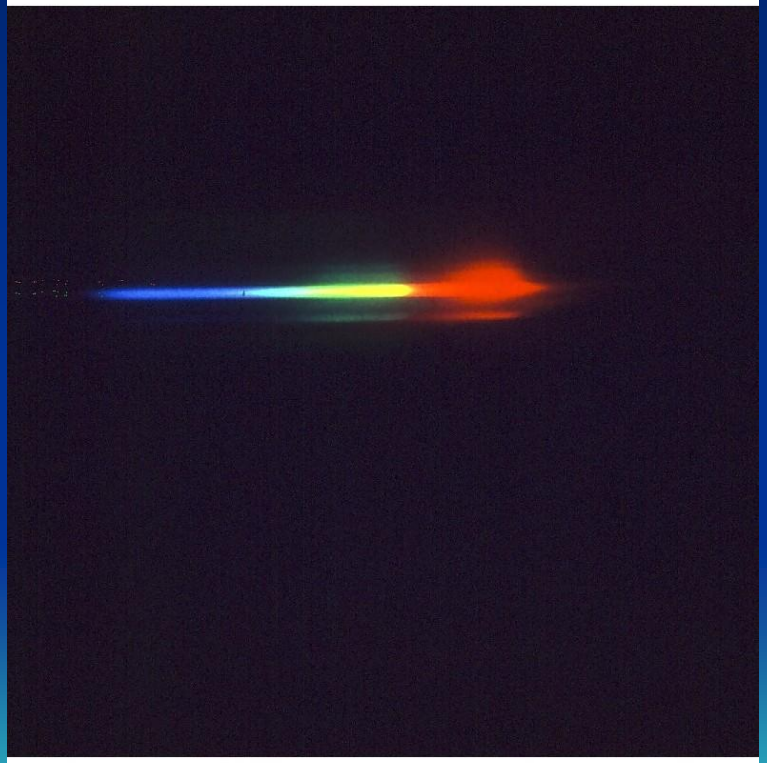
Αρχή φασματογράφου



Φάσμα υδρογόνου - II

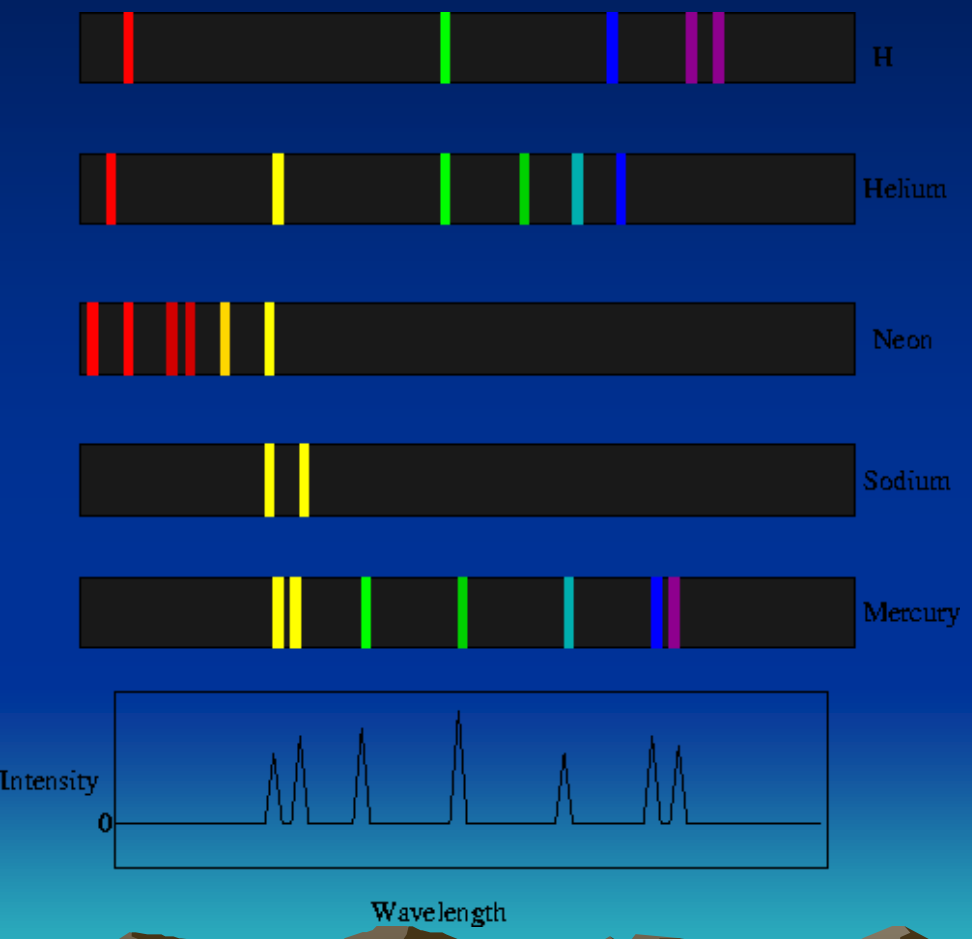


Φάσμα λυχνίας πυρακτώσεως



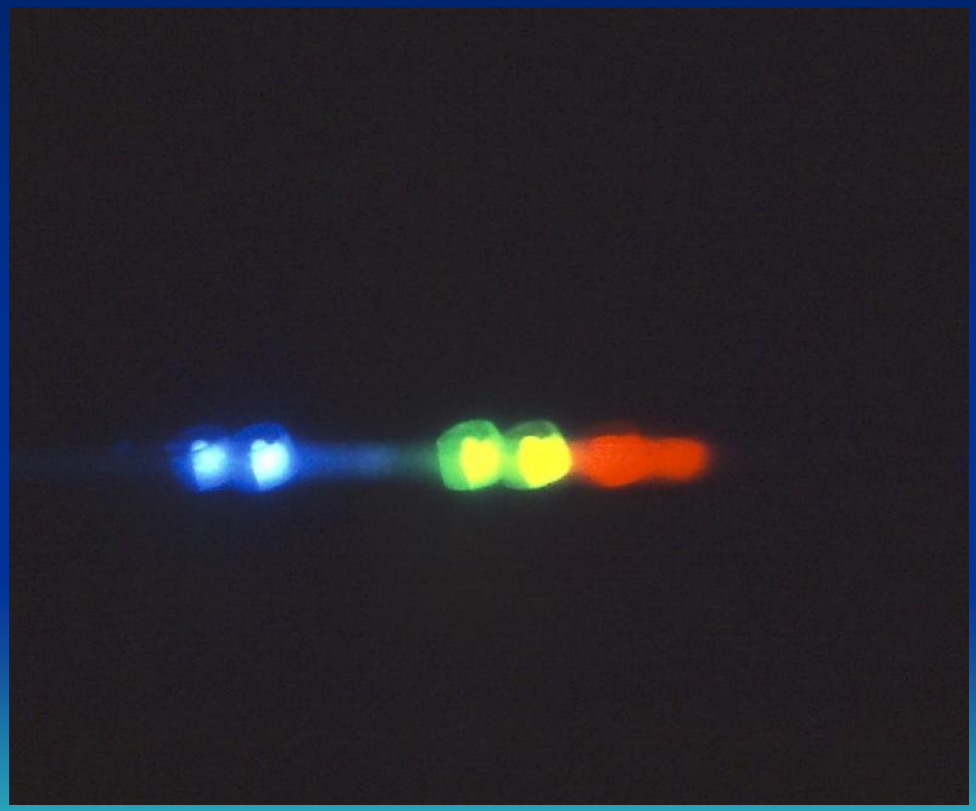
- Το φάσμα είναι συνεχές και έχει μέγιστη ένταση στο ερυθρό, επειδή η θερμοκρασία του νήματος είναι ~2.500 K. Επομένως, σύμφωνα με τον νόμο του Wien, το φάσμα έχει μέγιστο στα ~10.000 Å (δηλαδή στο υπέρυθρο).

Φάσματα εκπομπής αερίων



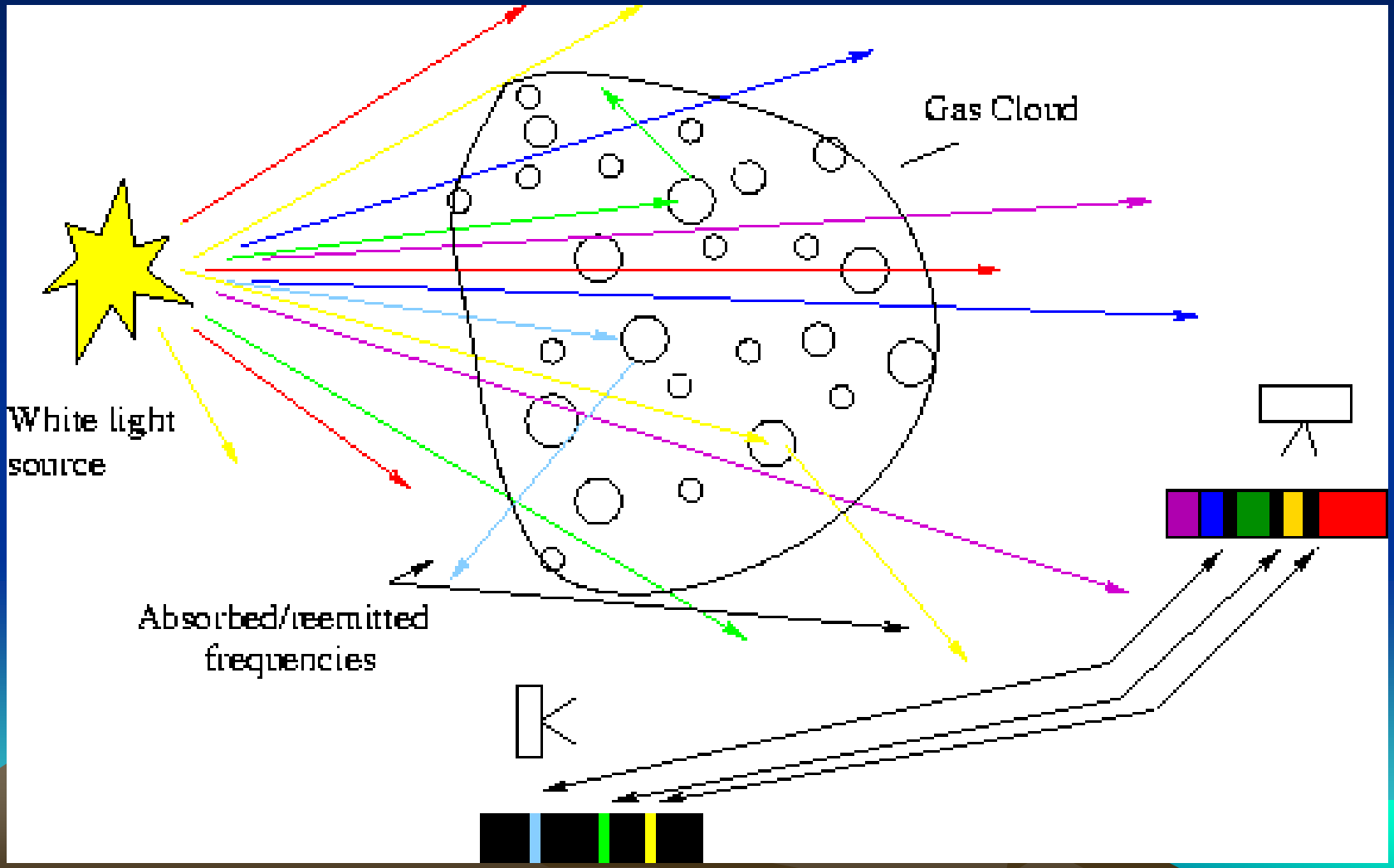
- Τα φάσματα εκπομπής των αερίων (και αυτά των ατμών των στερεών και υγρών) αποτελούνται από «γραμμές», σε συχνότητες χαρακτηριστικές για κάθε στοιχείο.

Λυχνία ατμών Hg

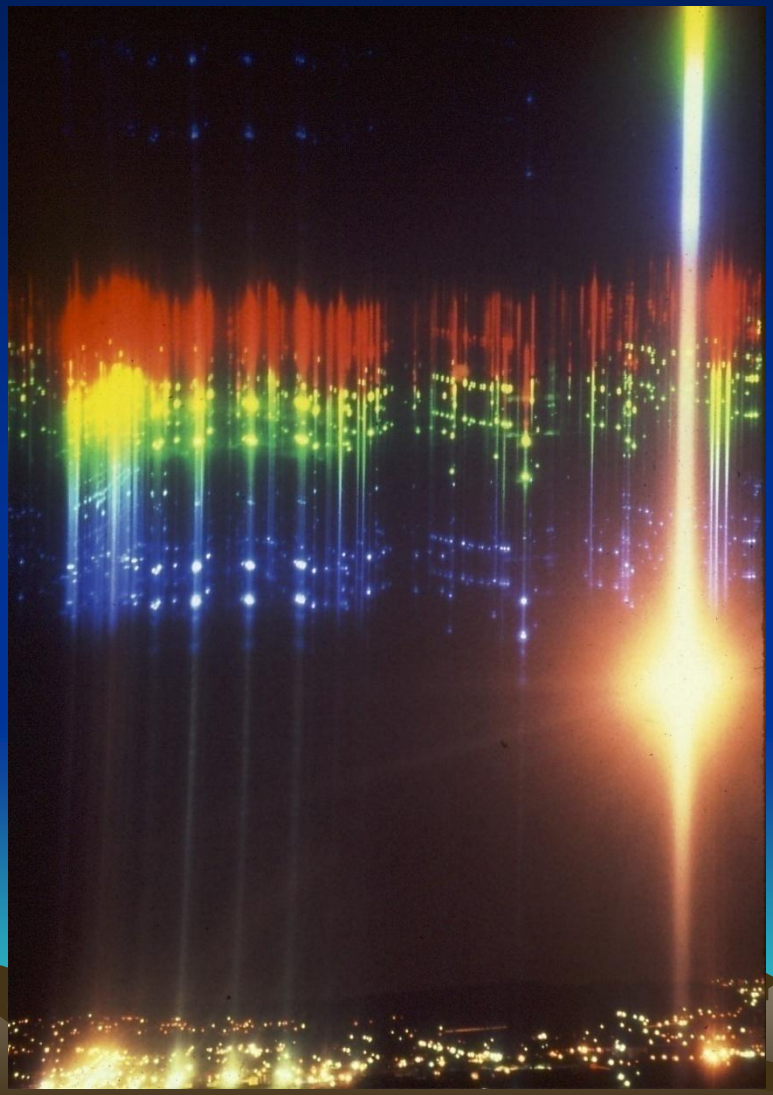


- Κοιτάζοντας μια λάμπα ατμών Hg μέσα από ένα φασματογράφο, βλέπουμε τόσα είδωλά της όσες είναι και οι ισχυρότερες φασματικές γραμμές του Hg στο ορατό (δύο μπλε, δύο κιτρινο-πράσινες και δύο κόκκινες).

Αστρονομικά φάσματα

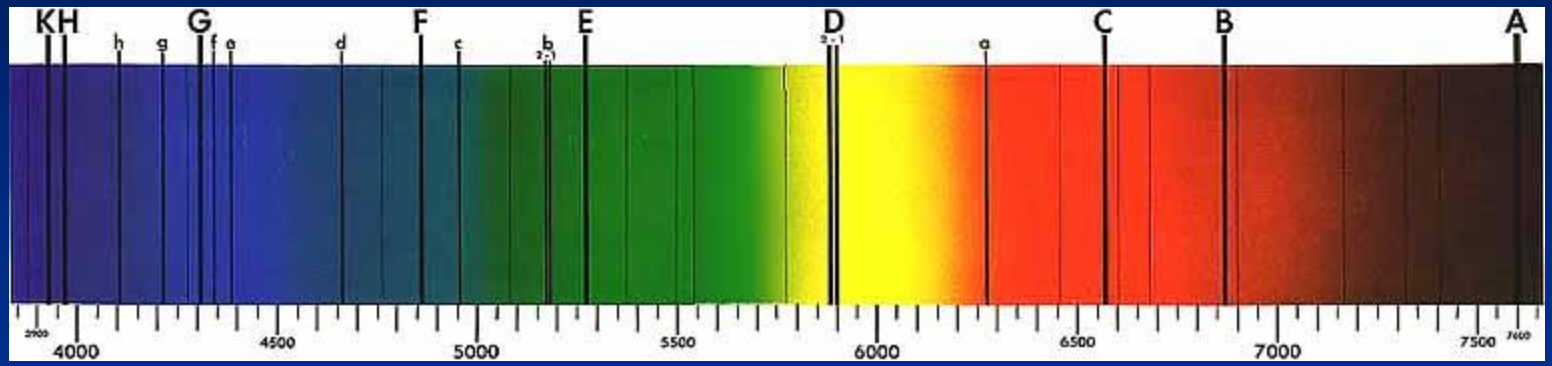


Ανατέλλουσα Σελήνη



- Επαλληλία μιας «κανονικής» φωτογραφίες (σε λευκό φως – κάτω) με μιας παρμένης μέσω ενός φασματογράφου (επάνω). Τα φώτα της πόλης προέρχονται κυρίως από λυχνίες ατμών Hg, και γι' αυτό έχουν τα χαρακτηριστικά χρώματα των φασματικών γραμμών αυτού του στοιχείου. Η Σελήνη δίνει ένα συνεχές φάσμα, επειδή ανακλά το ηλιακό φως.

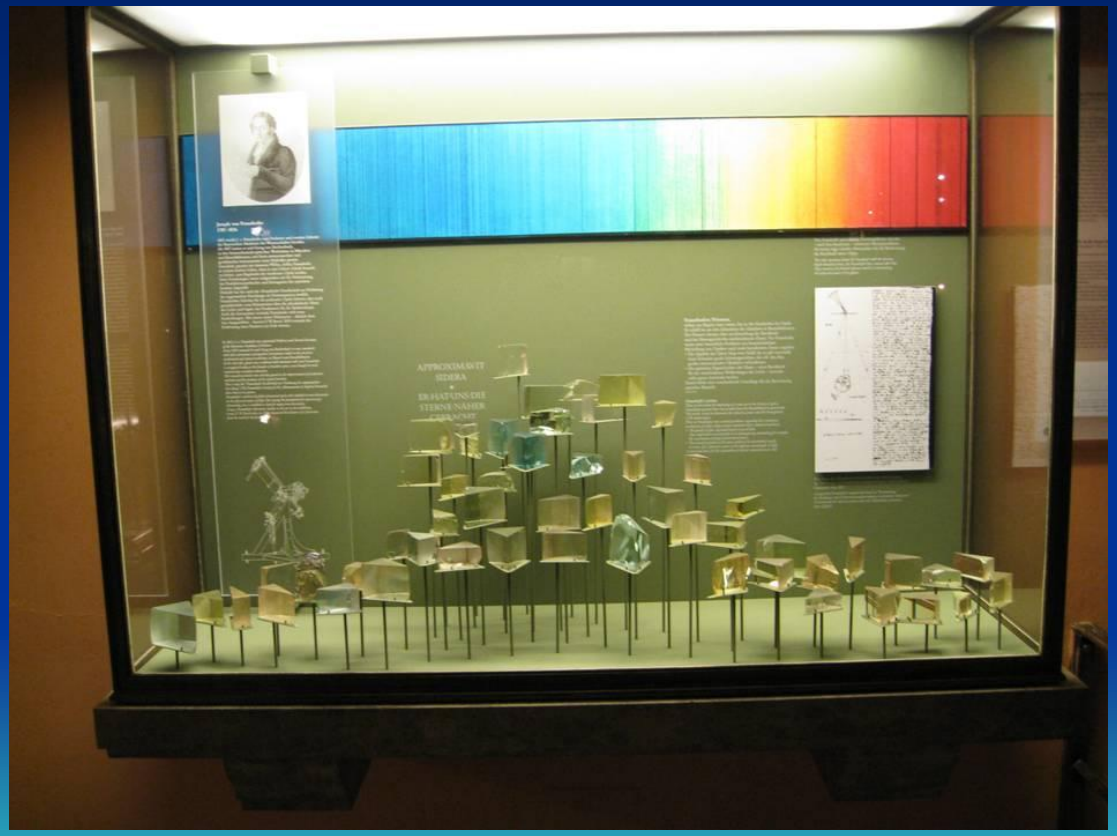
Γραμμές Fraunhofer (φάσμα Ήλιου)



- D : νάτριο
- d : ήλιο
- H, K, : ασβέστιο
- L : σίδηρος
- κλπ.

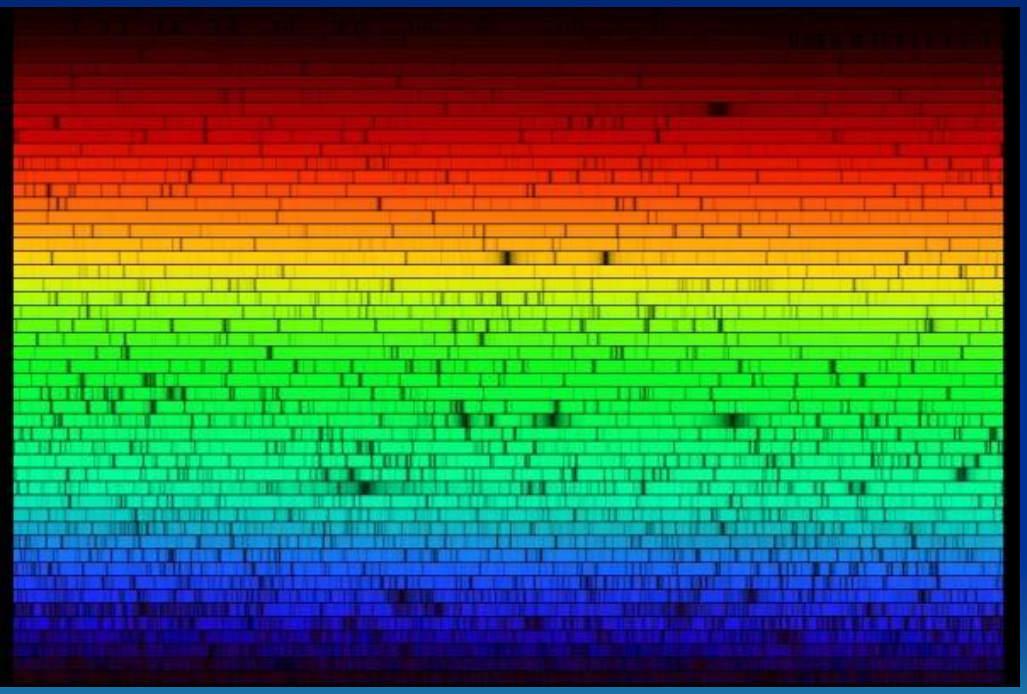
Γραμμές Fraunhofer – I

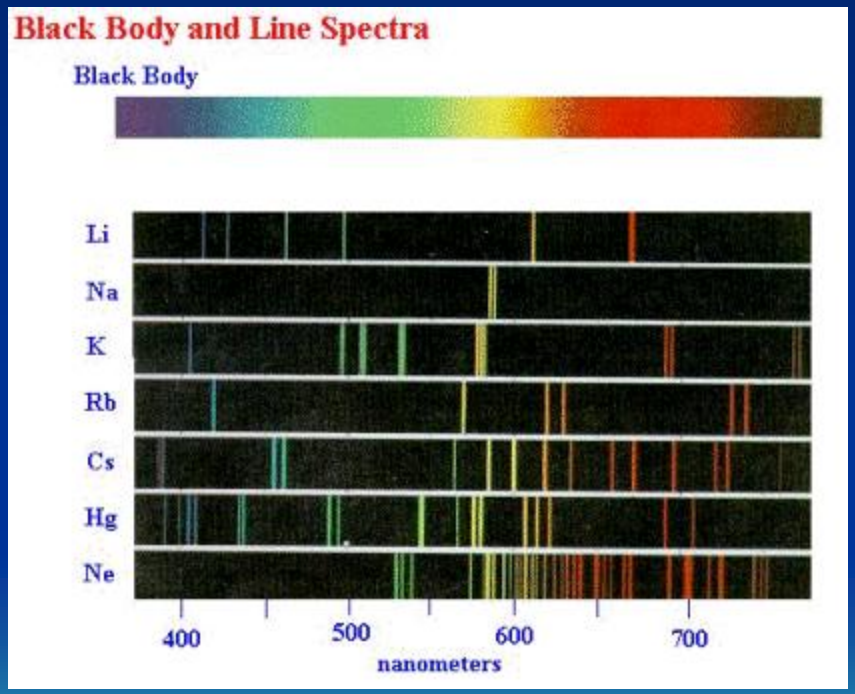
- Έχοντας για στόχο να κατασκευάσει φακούς πολλών στοιχείων, ο Fraunhofer προσπαθούσε να μετρήσει τον δείκτη διάθλασης γιαλιού διαφόρων ποιοτήτων.
- Για λόγους βαθμονόμησης, χρησιμοποιούσε τις (σκοτεινές) φασματικές γραμμές του ηλιακού φωτός.
- Τα μήκη κύματος που μέτρησε ήταν τα πρώτα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη θεμελίωση της Κβαντομηχανικής.



Από το Deutsches Museum

Η ανακάλυψη του ρουβίδιου και του καίσιου μέσω της φασματοσκοπίας





Ηλιακό φάσμα με τις γραμμές Fraunhofer

Γραμμικό φάσμα του ρουβίδιου και του καίσιου.

«Φαινομενικές» σχέσεις Οπτικής - Μηχανικής

- Αναλογία των ιδιοτήτων του «οπτικού δρόμου» του Fermat με την αρχή της ελάχιστης δράσης των Maupertuis-Lagrange-Hamilton.
- Το φως, ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα (όπως προέκυψε από το έργο του Maxwell) φαίνεται να συνδέει την ηλεκτροστατική δύναμη της μορφής $1/r^2$ με τη βαρυτική δύναμη (της ίδια μορφής).
- Αποτυχημένες προσπάθειες να «προκύψει» όλη η Φυσική από τα αξιώματα της Μηχανικής (Hertz).

Η Οπτική σήμερα

- Στο Γυμνάσιο-Λύκειο και στα πρώτα έτη του Πανεπιστημίου:
  - Γεωμετρική Οπτική (η έννοια της φωτεινής ακτίνας, ως το όριο του λόγου ισχύς/στερεά γωνία)
- Σε προχωρημένα μαθήματα Φυσικής:
  - Κυματική Οπτική.
- Σε ακόμη πιο προχωρημένα/μεταπτυχιακά μαθήματα:
  - Μη-Γραμμική Οπτική, LASER κλπ.