



EMPHASIS
RESEARCH
CENTRE



University
of Cyprus

Σταύρος Ιεζεκιήλ

Φωτονική, λέιζερ και οπτικές ίνες

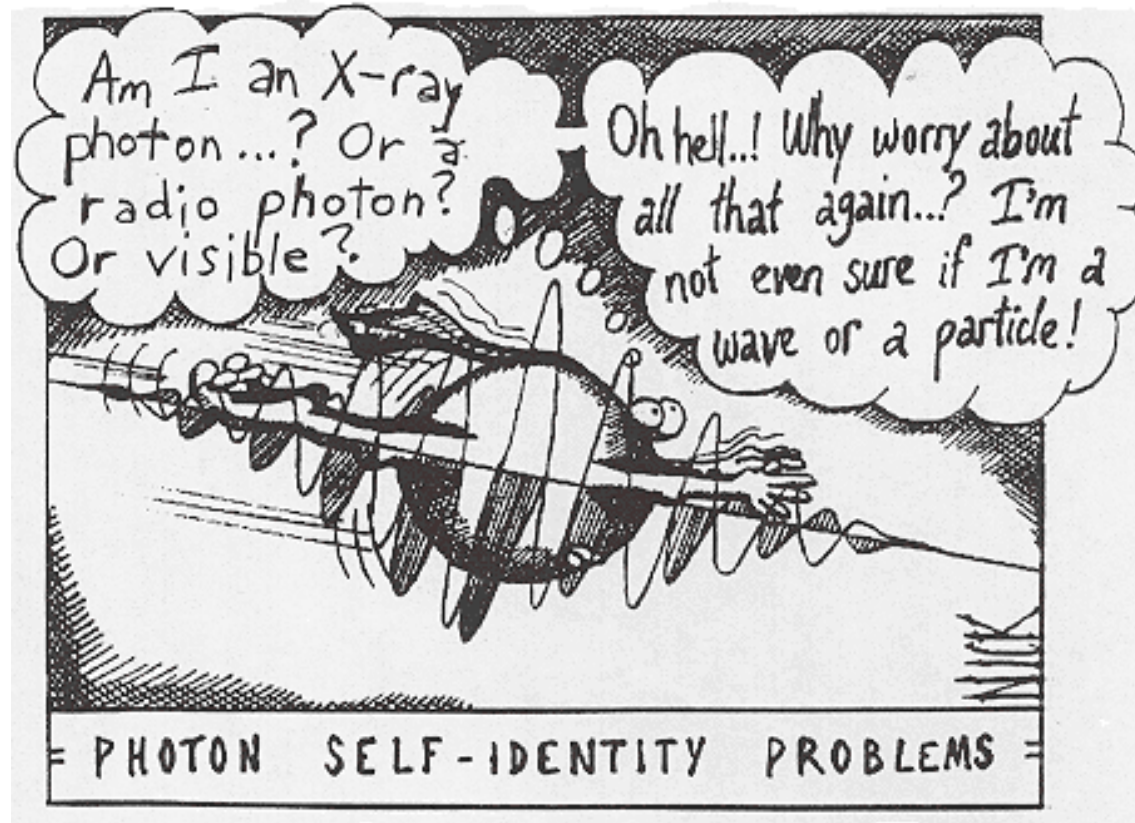
HMY 100

18/11/2021



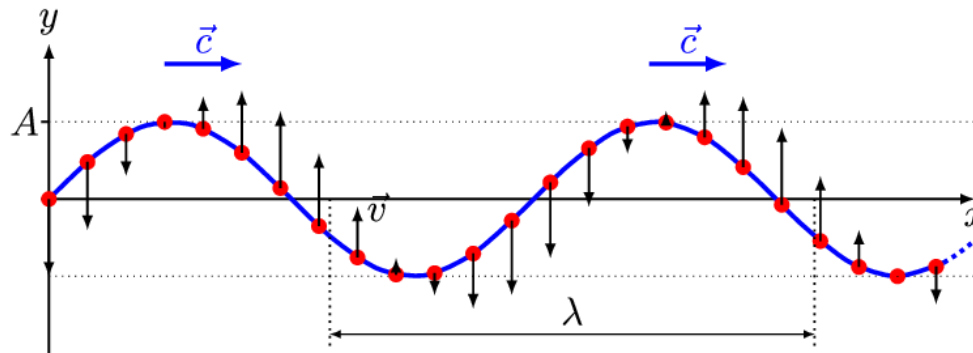
Sir William Henry Bragg:

"Light is waves on Mondays, Wednesdays, and Fridays; it's particles on Tuesdays, Thursdays, and Saturdays, and on Sundays, we think about it!"



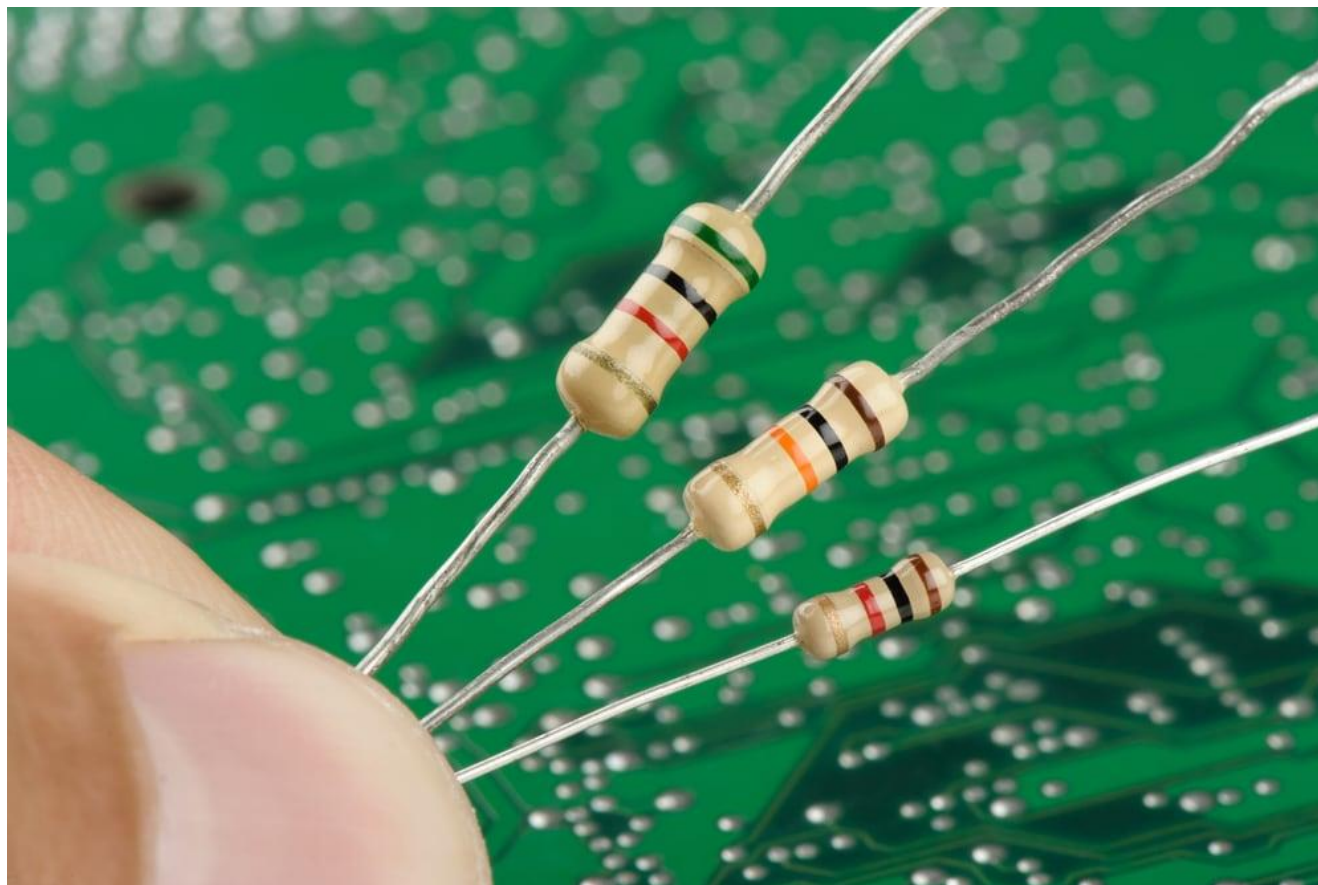
1. Μέγεθος αντικειμένων / μήκος κύματος

- Η ηλεκτρολογία συχνά ασχολείται με την αλληλεπίδραση **ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων** με το **κενό**, με **υλικά** και με **ηλεκτρονικά** και **οπτικά στοιχεία**.



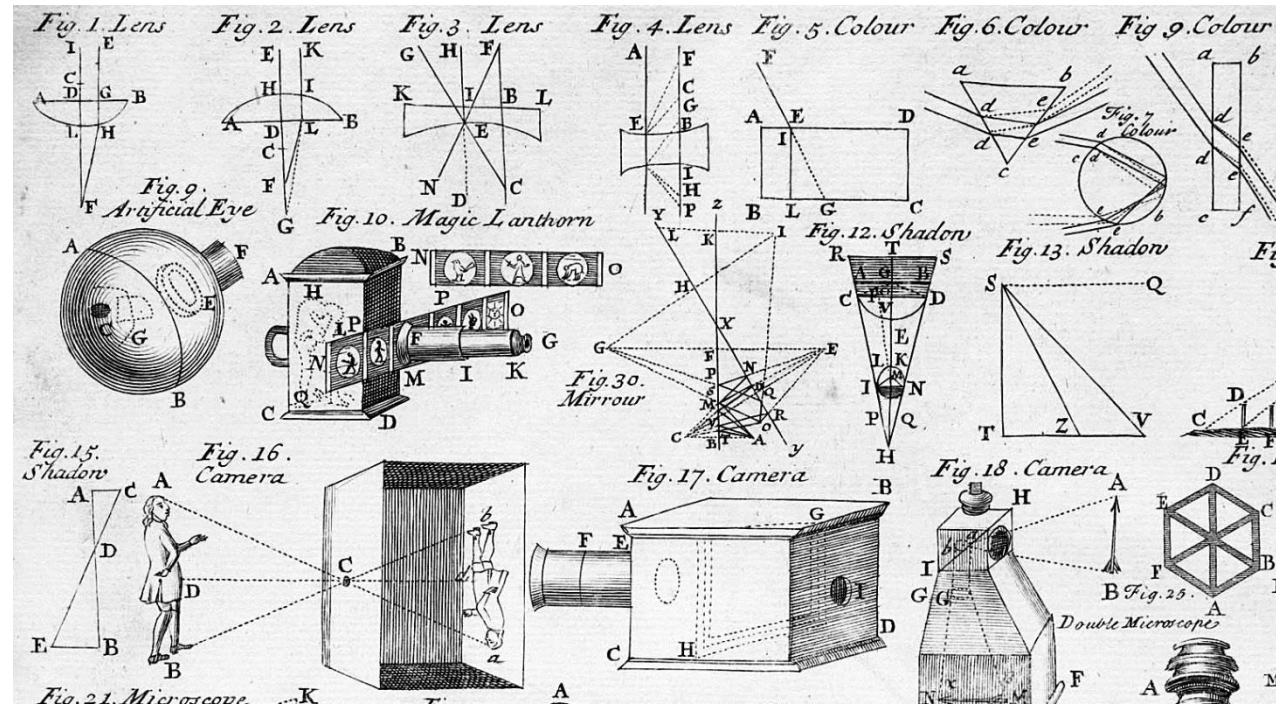
- Τα κύματα έχουν μια "διάσταση" - το μήκος κύματος.
- Πώς το μέγεθος αυτό συγκρίνεται με τις διαστάσεις των στοιχείων θα επηρεάσει τον τρόπο με τον οποίο αναλύουμε τα συστήματά μας.

- Στο **HMY 102** θα δείτε τη θεωρία των κυκλωμάτων. Αυτή η θεωρία ισχύει για τα ηλεκτρονικά κυκλώματα "χαμηλής συχνότητας".
- Για παράδειγμα, 3 kHz είναι χαμηλή συχνότητα - το αντίστοιχο μήκος κύματος είναι 100 km! Σε αυτές τις συχνότητες το μέγεθος D είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος.
- Σε τέτοιες χαμηλές συχνότητες, τα ηλεκτρονικά στοιχεία, όπως οι αντιστάτες, μπορούν να θεωρηθούν ότι δρουν σε ένα διακριτό σημείο στο διάστημα - αυτό οδηγεί στη θεωρία του **συσσωρευμένου κυκλώματος** (lumped element).
- Η θεωρία των συσσωρευμένων κυκλωμάτων είναι μια προσέγγιση του ηλεκτρομαγνητισμού (**HMY 331**).



Στο HMY 102, $D \ll \lambda$

- Τώρα σκεφτείτε μια από τις παλαιότερες επιστήμες - **την οπτική**



- Είναι επίσης μια από τις πιο σύγχρονες επιστήμες - την ονομάζουμε **φωτονική**, και αρχίζετε να την μελετάτε στο **HMY 333**.

- Το ορατό τμήμα του φάσματος εκτείνεται από περίπου 380 nm έως 700 nm.



- Το πράσινο φως ξεκινά στα περίπου 500 nm.

$$\lambda_{green} \approx 500 \text{ nm} = 500 \times 10^{-9} \text{ m} = 0.5 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.5 \mu\text{m}$$

- Αυτό το μήκος κύματος είναι πολύ μικρότερο από τις τυπικές διαστάσεις εξαρτημάτων όπως οι φακοί που χρησιμοποιούνται σε οπτικά όργανα (π.χ. μικροσκόπια, τηλεσκόπια) ή ο φακός στο ανθρώπινο μάτι, τα οποία είναι όλα της τάξης του 1 cm.

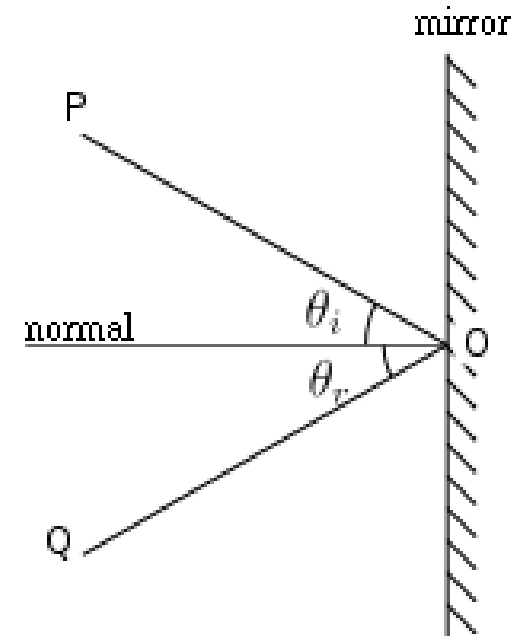
$$1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m} = 10^4 \mu\text{m} \approx 20,000 \lambda_{green}$$

Στην κλασική οπτική, $D \gg \lambda$

- Αυτό μας επιτρέπει να κάνουμε μια άλλη απλή προσέγγιση του ηλεκτρομαγνητισμού. Αυτή ονομάζεται γεωμετρική οπτική, και εδώ μοντελοποιούμε τη συμπεριφορά του φωτός με ακτίνες.

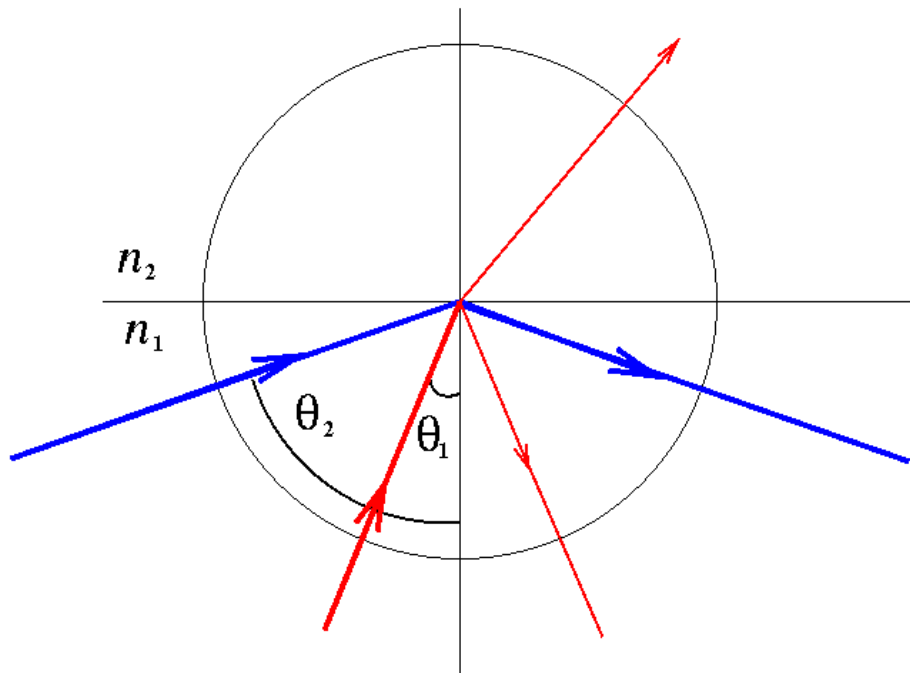


Πραγματικό σύστημα

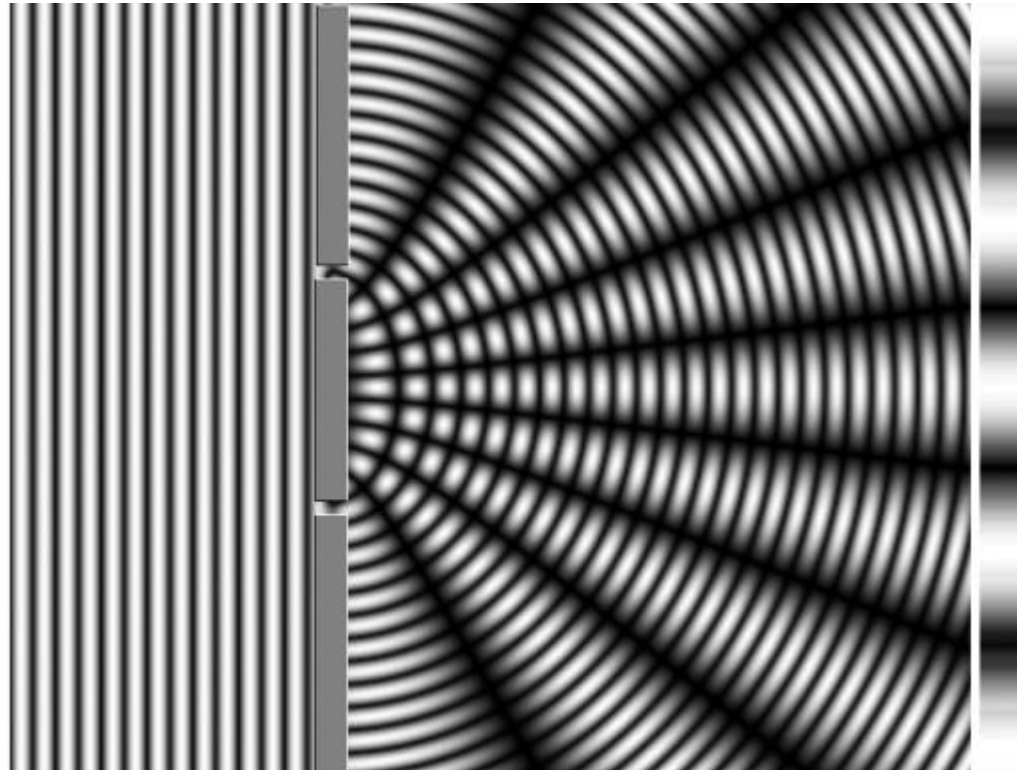


Μοντέλο γεωμετρικής οπτικής

- Με τη γεωμετρική οπτική, μπορούμε να αναλύσουμε χρήσιμα φαινόμενα όπως την ανάκλαση, τη διάθλαση και την **ολική εσωτερική ανάκλαση**



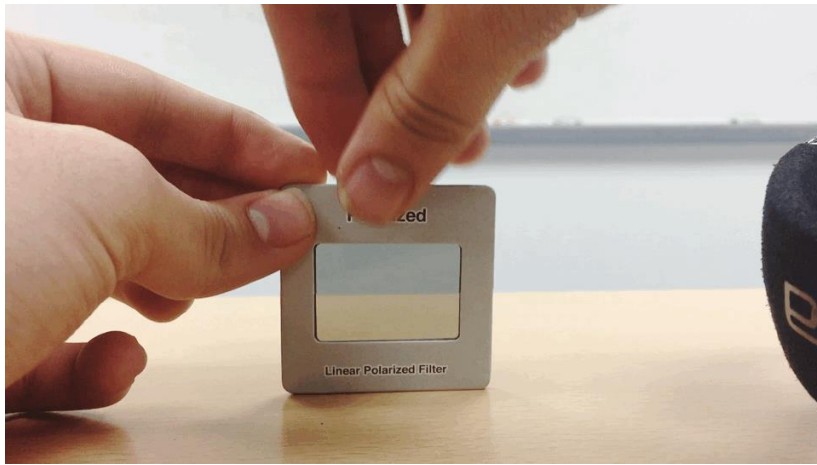
- Και πάλι, πρέπει να είμαστε προσεκτικοί με τις προσεγγίσεις μας. Για παράδειγμα, όταν το φως περνά μέσα από μια μικρή σχισμή παρατηρούμε ένα φαινόμενο που δεν μπορεί να αναλυθεί με γεωμετρική οπτική.
- Για να αναλύσουμε τη περίθλαση (diffraction), χρειαζόμαστε ένα μοντέλο κύματος.



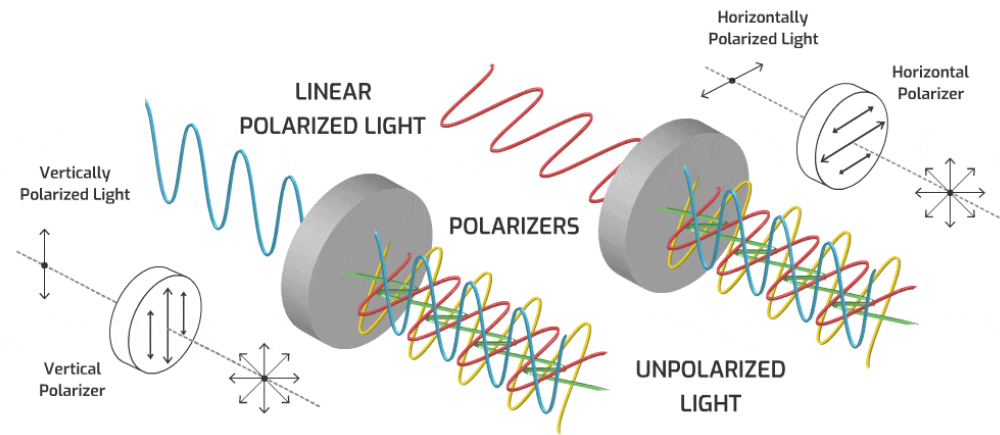
$$D \approx \lambda$$

Κυματική οπτική

- Μέχρι το τέλος του δέκατου ένατου αιώνα, το θεωρητικό έργο του Maxwell και τα πειράματα του Hertz οδήγησαν στην αντίληψη ότι μπορούμε να μοντελοποιήσουμε όχι μόνο τα φαινόμενα της ανάκλασης, της διάθλασης και της περίθλασης, αλλά και της πόλωσης με **ηλεκτρομαγνητικά κύματα**.



Πόλωση του φωτός



Αλλαγή καταστάσεων πόλωσης

- Στις αρχές του εικοστού αιώνα ο Πλανκ και ο Αϊνστάιν ανέπτυξαν την **κβαντική θεωρία** για να περιγράψουν νέα φαινόμενα (π.χ. το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο) που δεν μπορούσαν να περιγράψουν με την κλασική φυσική. Εδώ, χαρακτηρίζουμε το φως χρησιμοποιώντας σωματίδια, γνωστά ως **φωτόνια**.



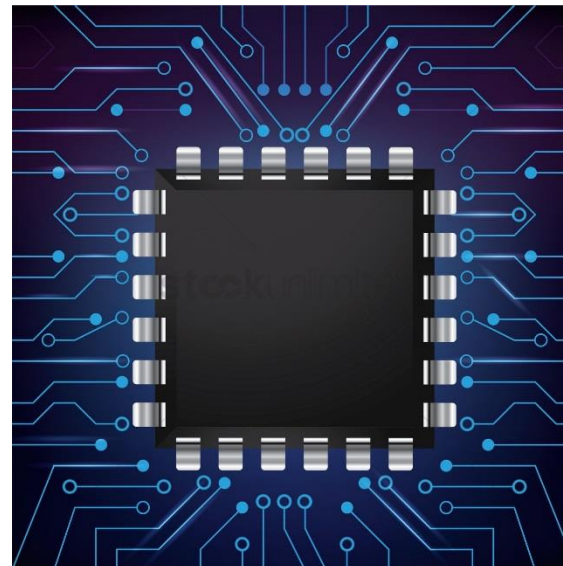
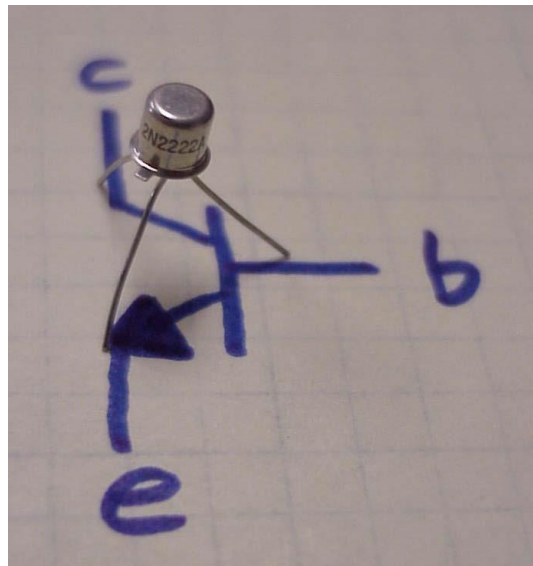
$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

h = Planck's constant = 6.626×10^{-34} Js

2. Ηλεκτρονική και Φωτονική

- Τα ηλεκτρονικά ρεύματα αποτελούνται από μια ροή ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα αφορούν την παραγωγή, διάδοση, επεξεργασία και ανίχνευση ηλεκτρονικών σημάτων.
- Το πεδίο των ηλεκτρονικών συσκευών αναπτύχθηκε ραγδαία από το **τρανζίστορ** και το **ολοκληρωμένο κύκλωμα**. Το κινητό τηλέφωνο που κρατάτε στο χέρι σας περιλαμβάνει προηγμένα κυκλώματα τρανζίστορ τα οποία χρησιμοποιούνται για δύο βασικές λειτουργίες – υπολογιστικές, και ασύρματες επικοινωνίες.

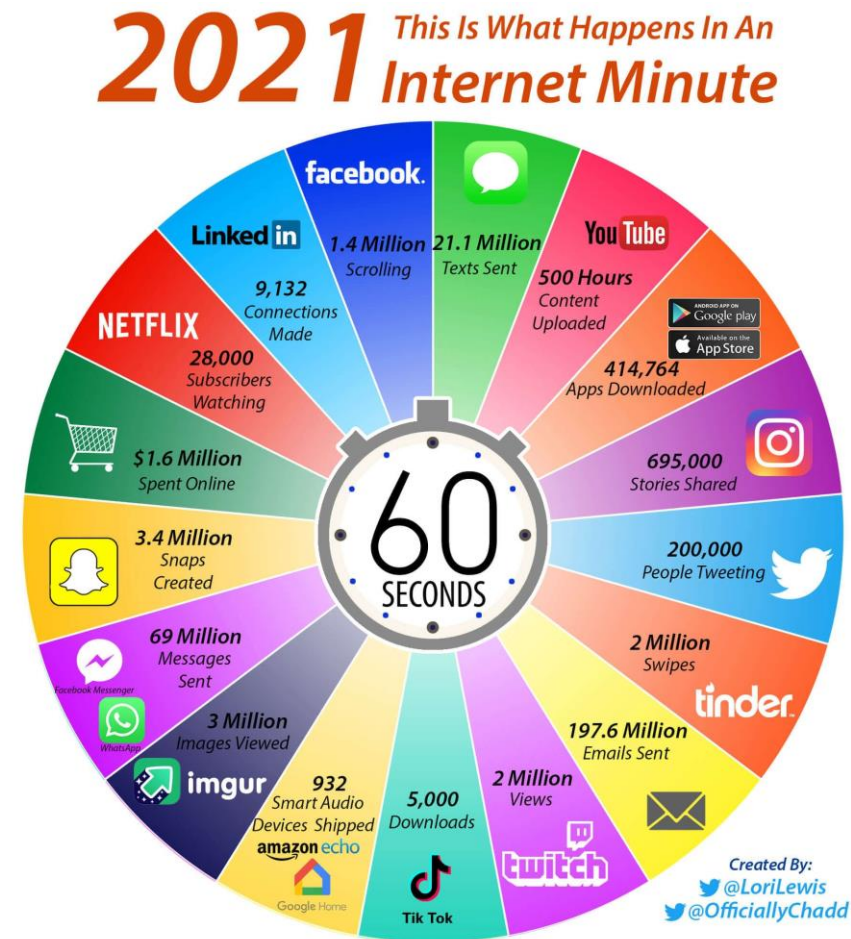
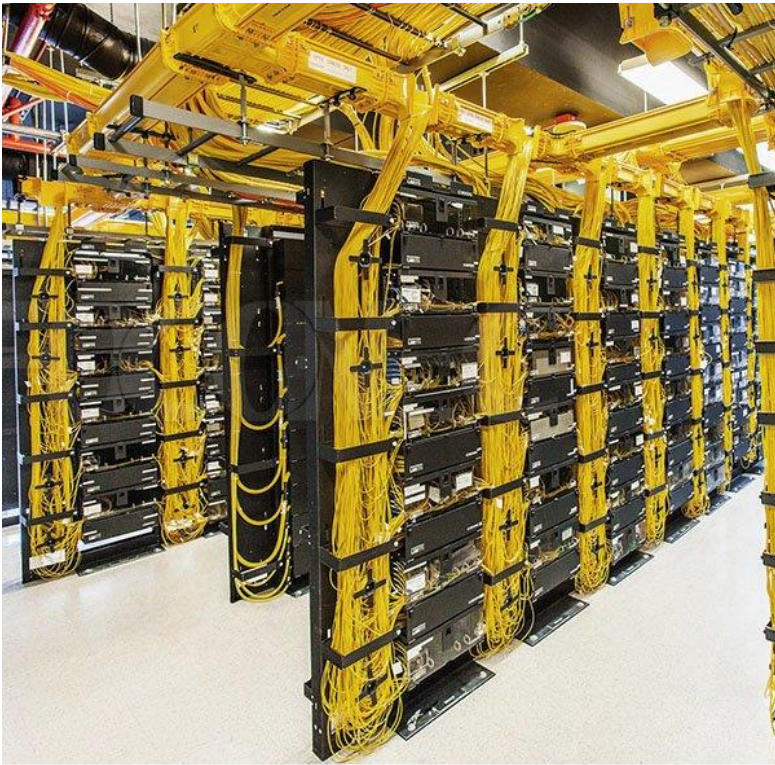
<http://www.coltecnica.com/images/transistor.jpg>



- Ένα κέντρο δεδομένων (data centre) είναι σαν το σύγχρονο καθεδρικό ναό ηλεκτρονικών. Το οποίο περιέχει πολλούς υπολογιστές (servers):

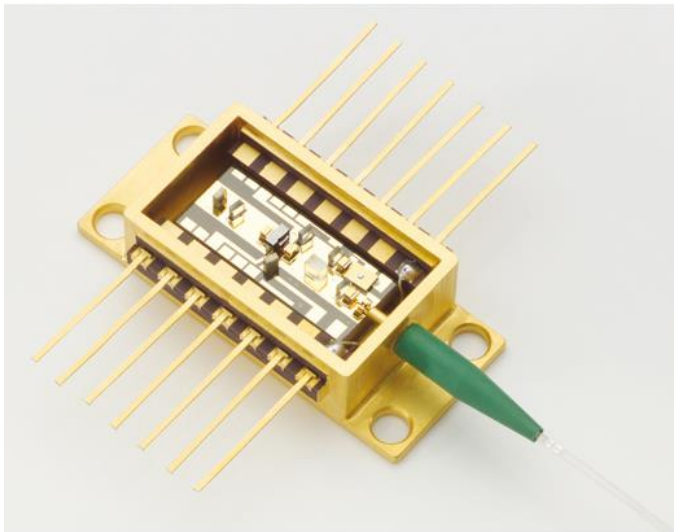


- Ένα κέντρο δεδομένων περιέχει επίσης φωτονικά στοιχεία:

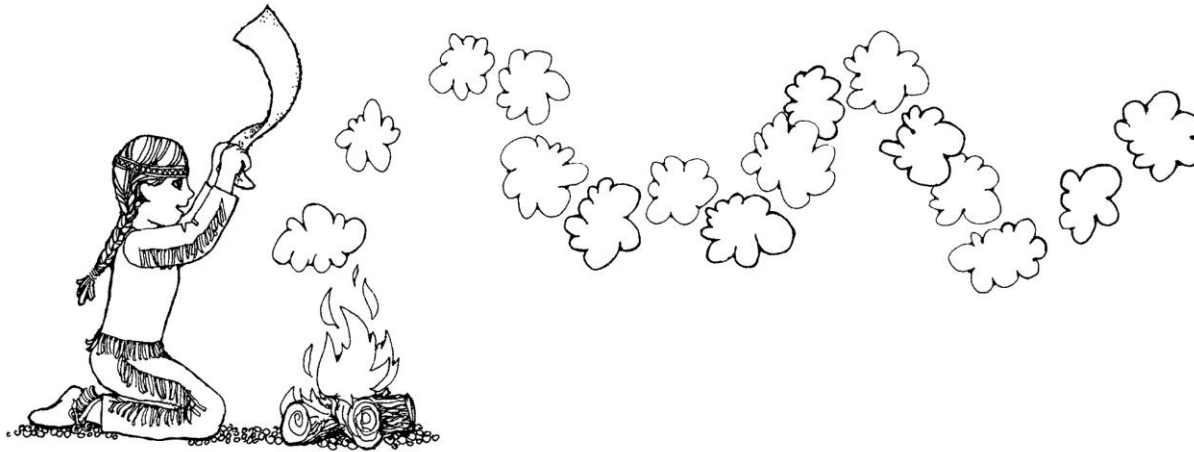
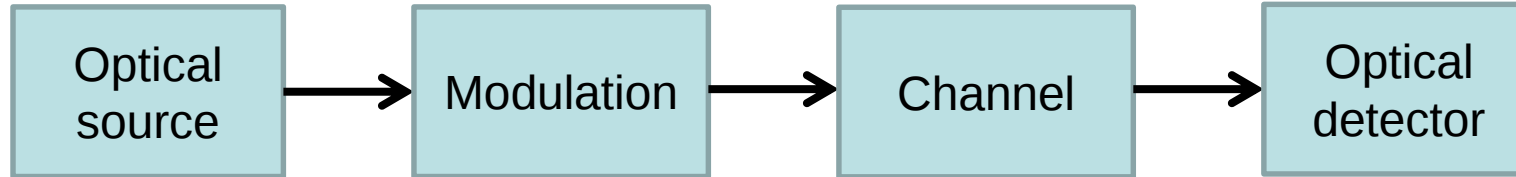


- Χωρίς τη φωτονική, το διαδίκτυο δεν θα ήταν τόσο δυνατό.

- Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το φως αποτελείται από μια "ροή" φωτονίων. Η φωτονική ασχολείται με τη δημιουργία, τη διάδοση, την επεξεργασία και την ανίχνευση φωτονικών σημάτων.
- Το πεδίο της φωτονικής αναπτύχθηκε από το λέιζερ και τις οπτικές ίνες. Κάθε φορά που χρησιμοποιείτε το διαδίκτυο (είτε με το τηλέφωνό σας είτε με έναν υπολογιστή), μια τεράστια υποδομή οπτικών ινών χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των πληροφοριών, τόσο μέσα σε κέντρα δεδομένων όσο και σε ολόκληρες ηπείρους.

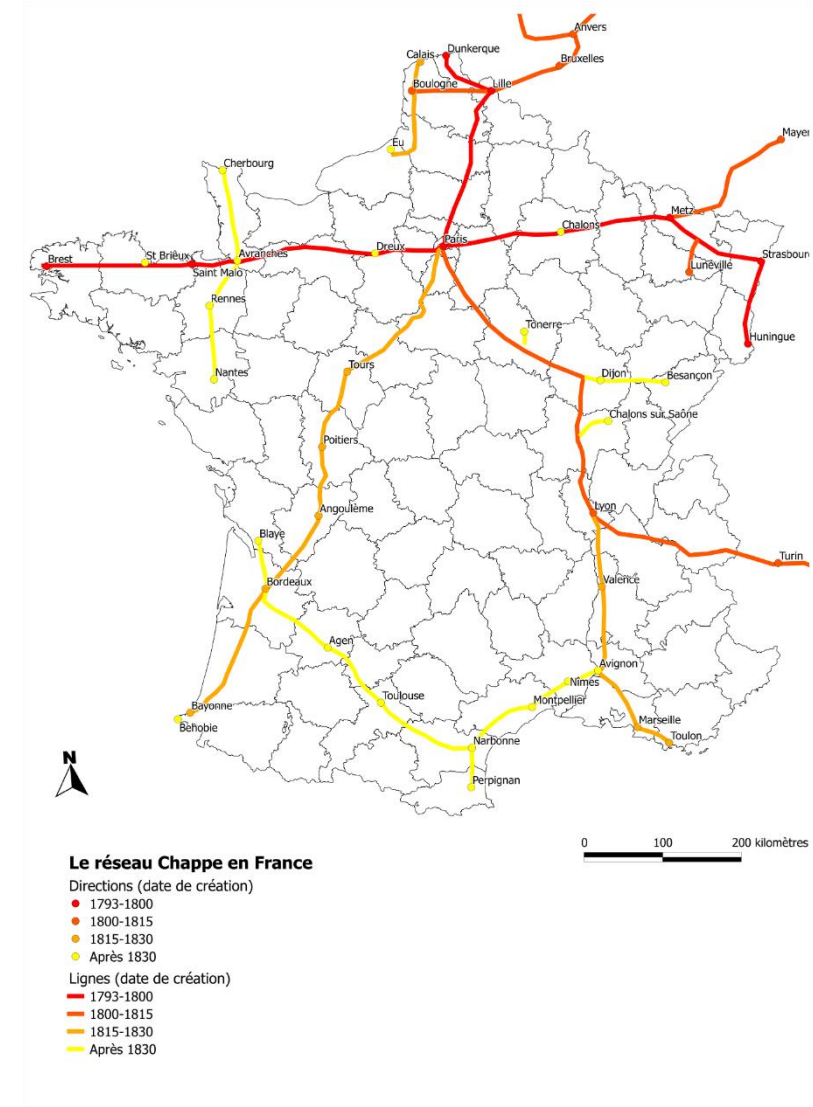
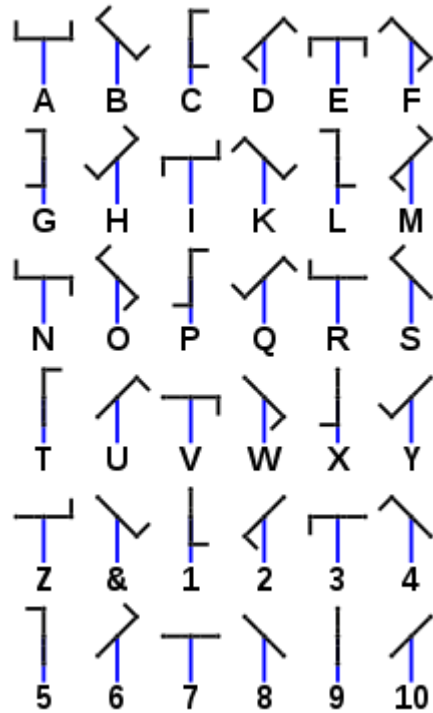


Ας πάμε πίσω στο χρόνο για να δούμε έναν βασικό οπτικό σύνδεσμο επικοινωνίας:

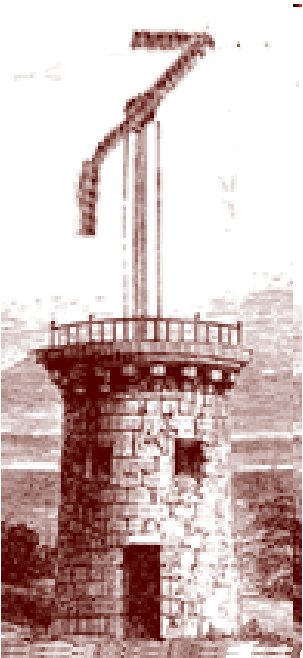


Είναι αναλογικό η ψηφιακό το σύστημα αυτό;

- Οι ψηφιακές οπτικές επικοινωνίες έχουν μακρά ιστορία, π.χ. ο οπτικός σηματοφόρος στη Ναπολεονική Γαλλία:



- Μπορείτε να σκεφτείτε τα πιο σημαντικά στοιχεία για να περιγράψετε την απόδοση αυτού του συστήματος;



Claude Chappe's Optical Telegraph (1793 – 1852, France)

Bit rate	< 1 bit/s
Repeater spacing	9.6 km
Speed of transmission	160 km in 30 minutes
Bit error rate	??

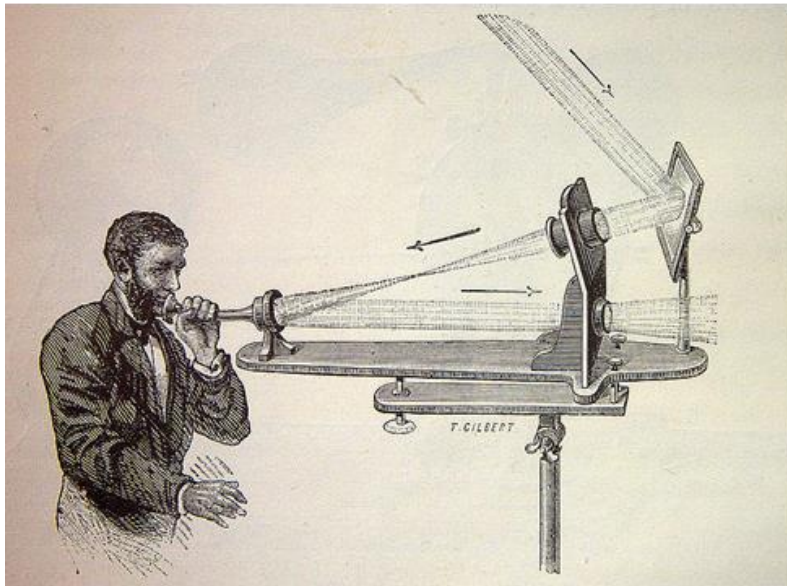
- Συγκρίνετε αυτό με ένα σύγχρονο σύστημα οπτικών ινών:

A modern system (2018 - Japan)

Bit rate	159 Tbit/s
Repeater spacing	1045 km
Speed of transmission	Speed of light (in fibre)
Bit error rate	Error-free

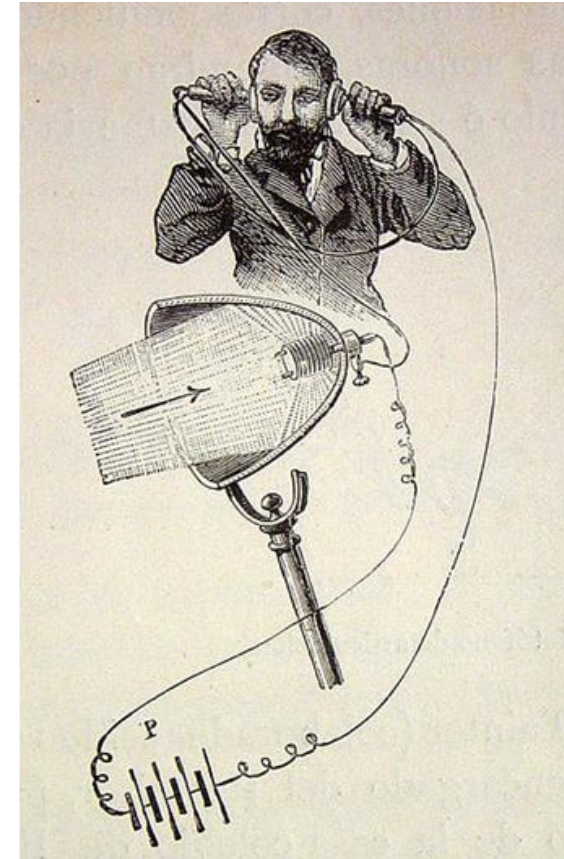
Bell's photophone 1880

- Αναλογικός οπτικός σύνδεσμος
- Πρώτη χρήση της τεχνολογίας οπτό-ηλεκτρονική



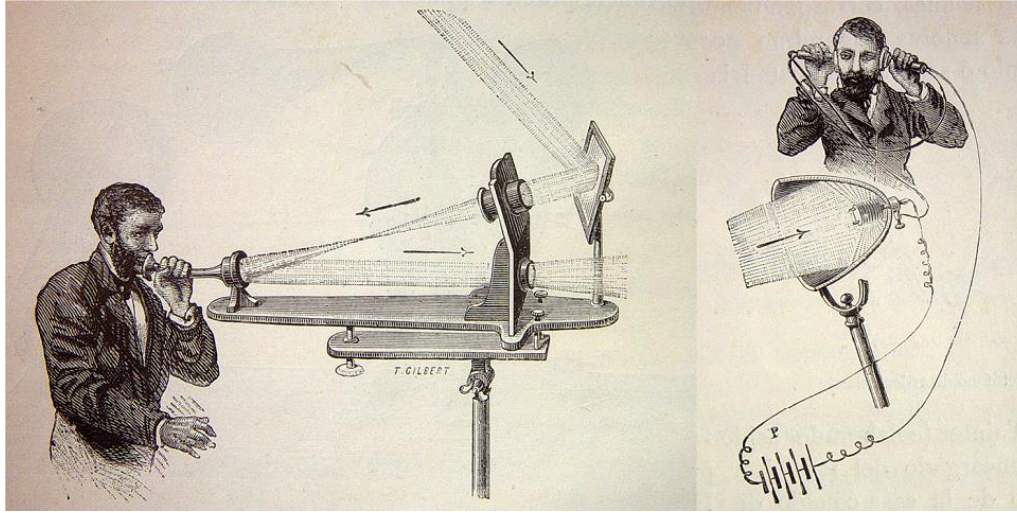
Πομπός

- Το φως διαμορφώνεται από ένα δονητικό καθρέφτη (οπτό-μηχανικό)



Δέκτης

- Το φως ανιχνεύεται χρησιμοποιώντας σελήνιο (η αντίσταση μειώνεται με την αυξανόμενη ένταση του φωτός)
- Πρώτο παράδειγμα οπτό-ηλεκτρονικού δέκτη



Bell's Photophone (1880 – USA)

Είναι αναλογικό ή ψηφιακό;

Αναλογικό

Καταλληλότερη αριθμητική αξία?

SNR

Άλλοι σημαντικοί παράμετροι?

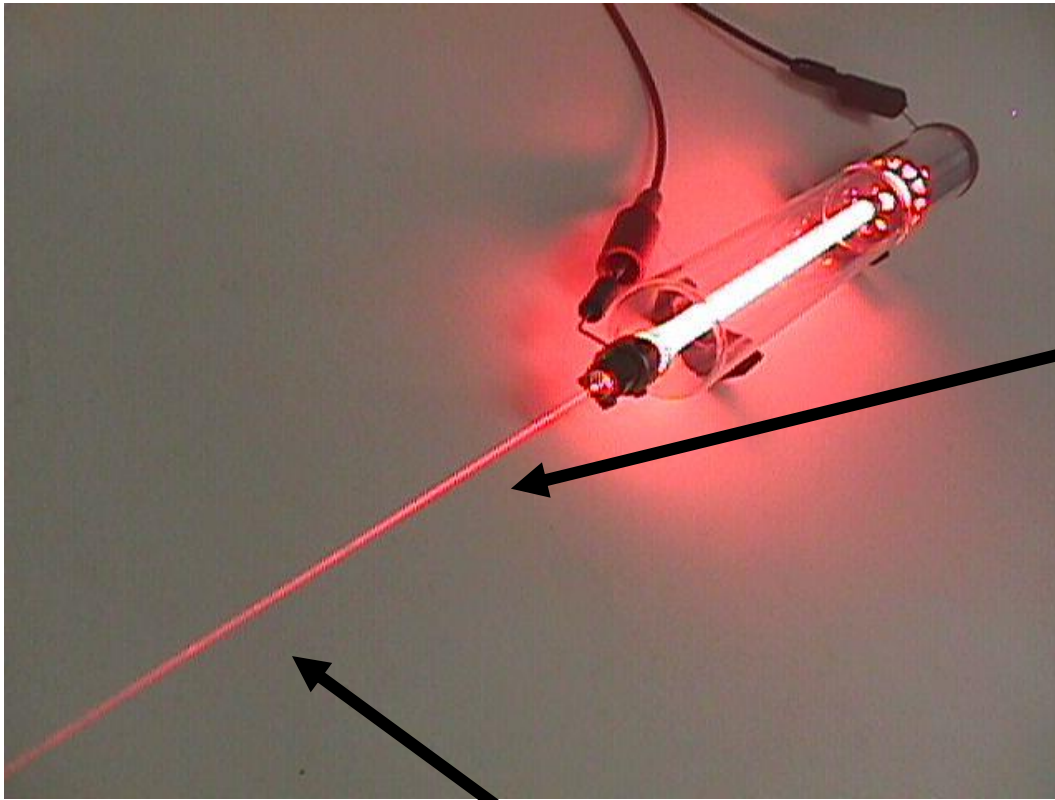
Απόσταση, ισχύ οπτικής πηγής, το κανάλι
– απώλειες, παρεμβολές

- Υπάρχουν δύο βασικά μειονεκτήματα
 - Το κανάλι μεταξύ του πομπού και του δέκτη είναι ο ελεύθερος χώρος (κενό)
 - Η οπτική πηγή είναι εξωτερική (π.χ. ακτίνες ηλίου)
- Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε μια ηλεκτροπτική πηγή. Τι λέτε για έναν λαμπτήρα;

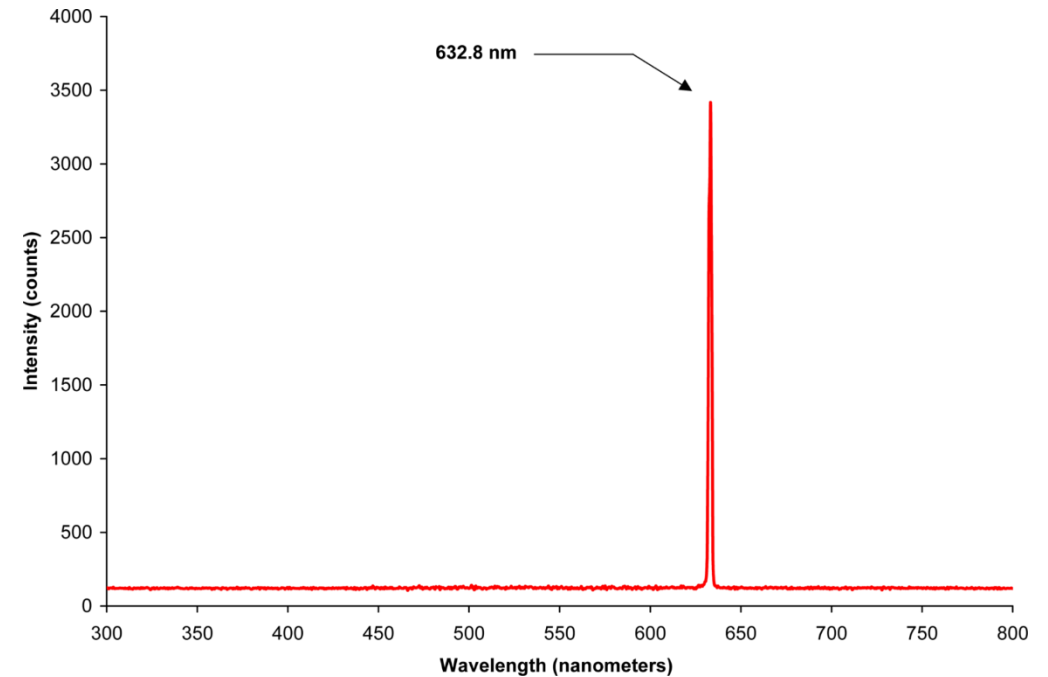


- Ο λαμπτήρας είναι χρήσιμος για φωτισμό, αλλά όχι για επικοινωνίες!!!
1. Δεν είναι μονοχρωματικός
 2. Δεν είναι σύμφωνος
 3. Δεν είναι κατευθυντικός

- Αυτή η πηγή είναι καλύτερη:



- λέιζερ Ηλίου-Νέου
- Το φως είναι σχεδόν μονοχρωματικό

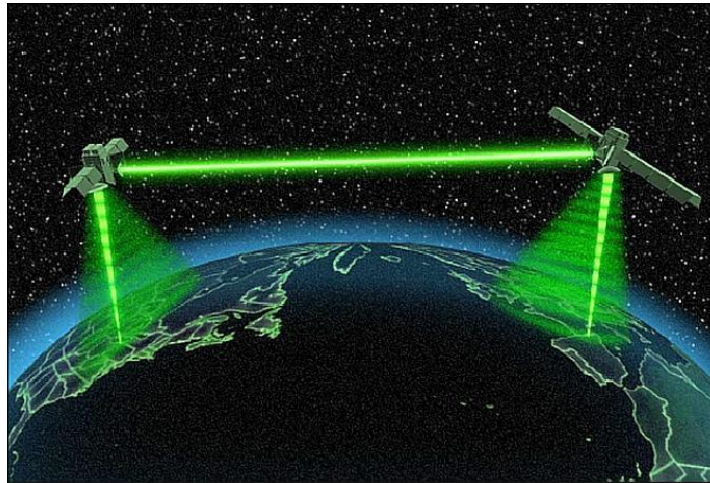


- Η δέσμη είναι κατευθυντική

- Το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται από ένα λέιζερ Ηλίου-Νέου (HeNe) είναι 632.8 nm.
- Υπολογίστε την αντίστοιχη συχνότητα

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{2.998 \times 10^8}{632.8 \times 10^{-9}} = 473.8 \text{ THz}$$

Ένα πρόβλημα όταν το κανάλι είναι οπτικό σύστημα ελεύθερου χώρου (free space optics) είναι ότι δεν υπάρχει καθοδηγημένο κανάλι μεταξύ του πομπού και του δέκτη



Για κάποιες εφαρμογές, όπως οι σύνδεσμοι μεταξύ των δορυφόρων που χρησιμοποιούν λέιζερ, αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα.

Ωστόσο, για επίγειες οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι καιρικές συνθήκες:



- Είδαμε στην προηγούμενη εβδομάδα ότι ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) είναι σημαντικός για το ραντάρ. Είναι επίσης σημαντικό για τους δέκτες που χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες.
- Στις επικοινωνίες, υπάρχει πάντα ένας «πόλεμος» μεταξύ του σήματος (του επιθυμητού) και του θορύβου (του ανεπιθύμητου). Για αξιόπιστες επικοινωνίες, πρέπει να έχουμε αρκετό SNR, και ισχύος και απόσταση μεταξύ πομπό και δέκτη.



- Μικρή απόσταση
- Χαμηλός θόρυβος
- Τα αυτιά είναι αρκετά ευαίσθητα και μπορούν να ανιχνεύσουν χαμηλούς ήχους



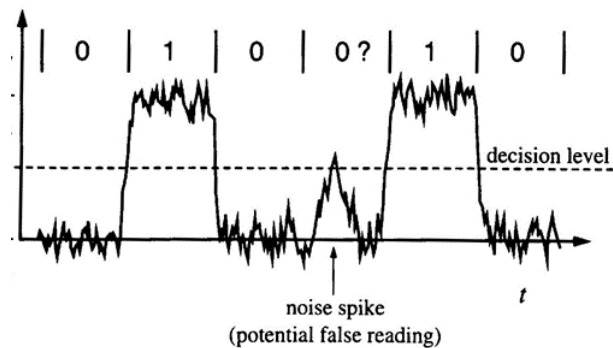
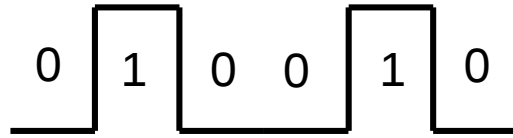
- Θόρυβος στον «δέκτη»

- Μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ του "πομπού" και του "δέκτη". Μπορεί να χρειαστεί ενίσχυση!



Επιστρέφοντας στις ψηφιακές οπτικές επικοινωνίες:

Ψηφιακή πληροφορία



Λαμβανόμενη πληροφορία

Διαμόρφωση οπτικής πηγής

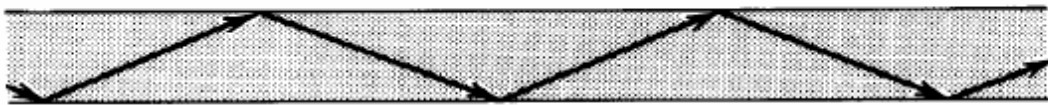
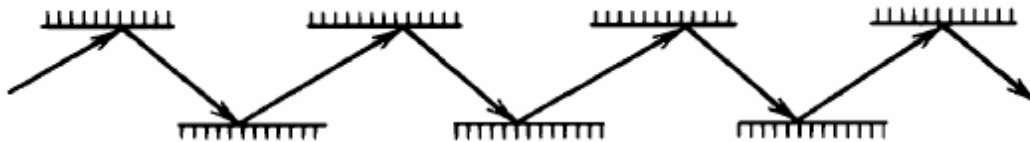
Οπτικό κανάλι

- Θέλουμε να καλύψουμε μεγάλη απόσταση
- Θέλουμε να μεταδώσουμε δεδομένα με υψηλή ταχύτητα

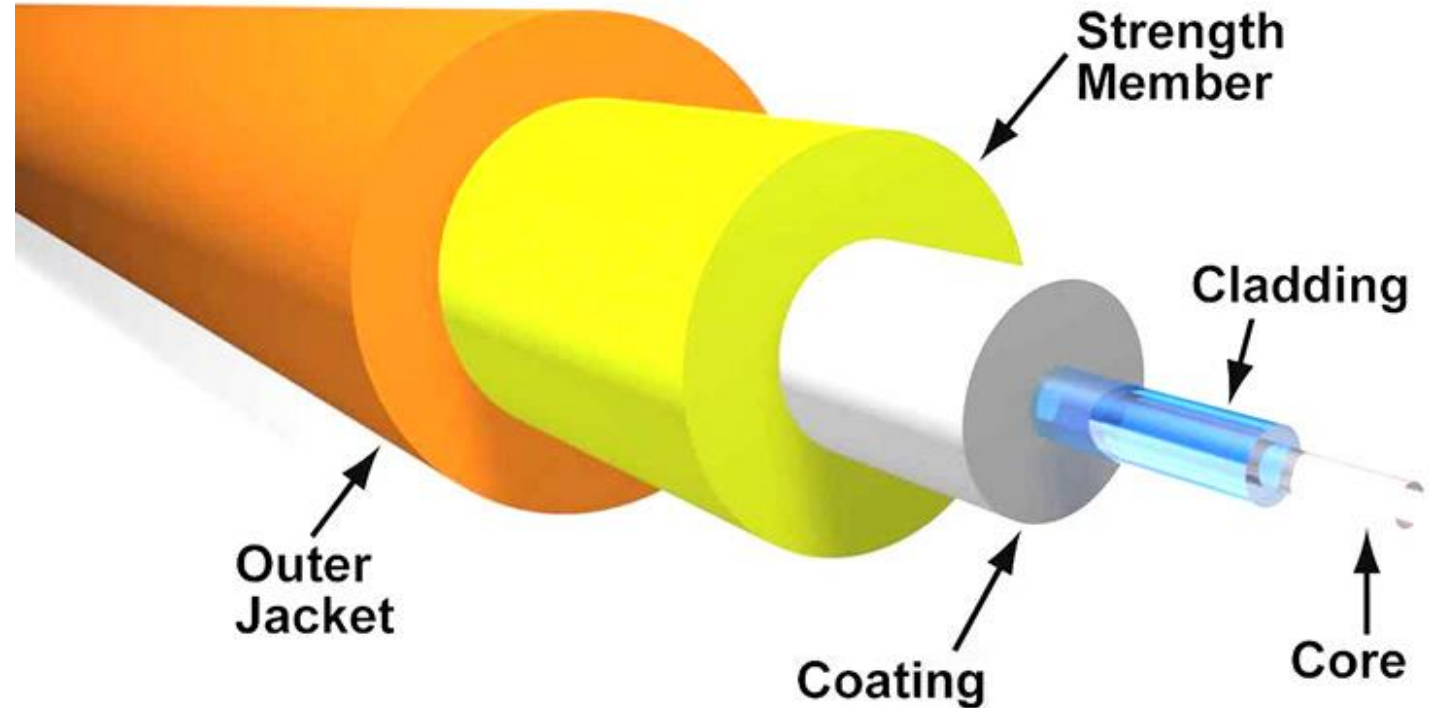
Οπτικός δέκτης

Αν θέλουμε να μεταδώσουμε οπτικά σήματα σε μεγάλες αποστάσεις και να μεταδώσουμε δεδομένα σε υψηλές ταχύτητες, χρειαζόμαστε ένα οπτικό μέσο που έχει χαμηλές απώλειες και έχει μεγάλο εύρος ζώνης.

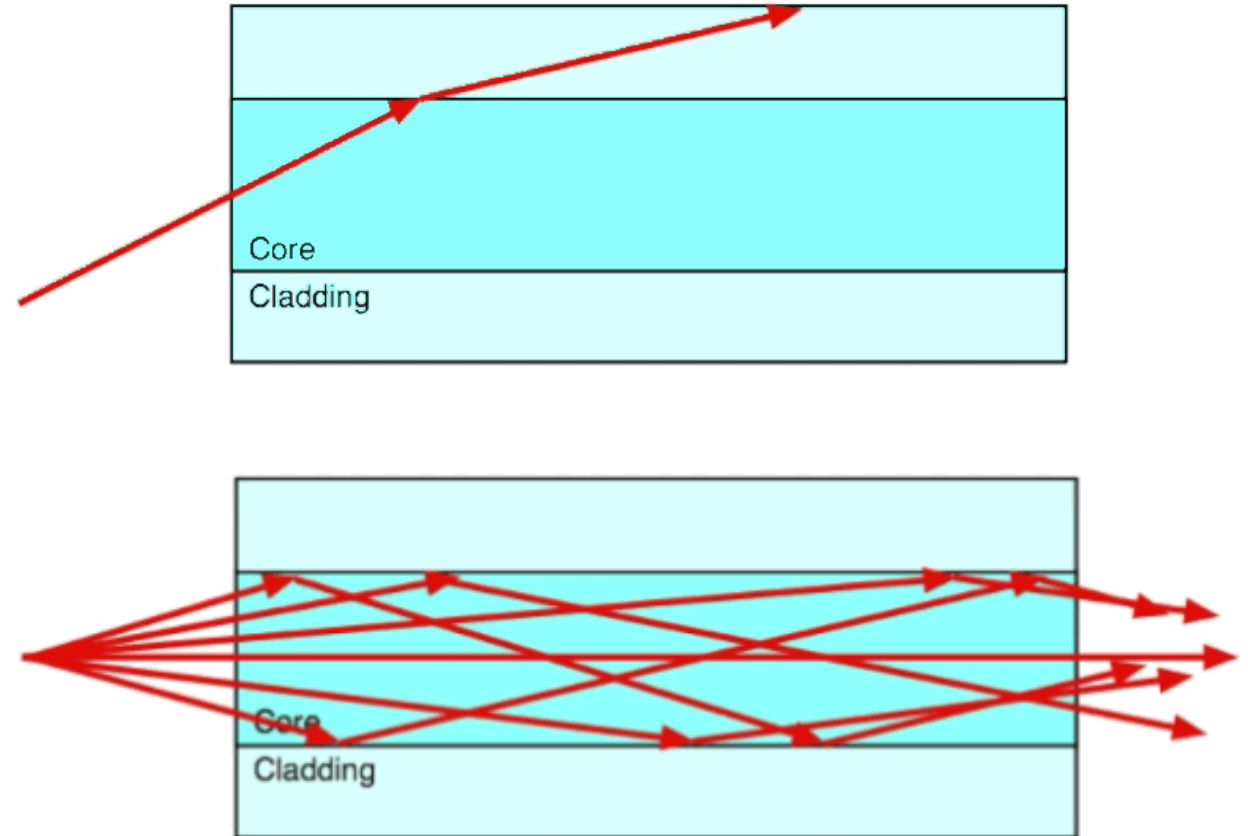
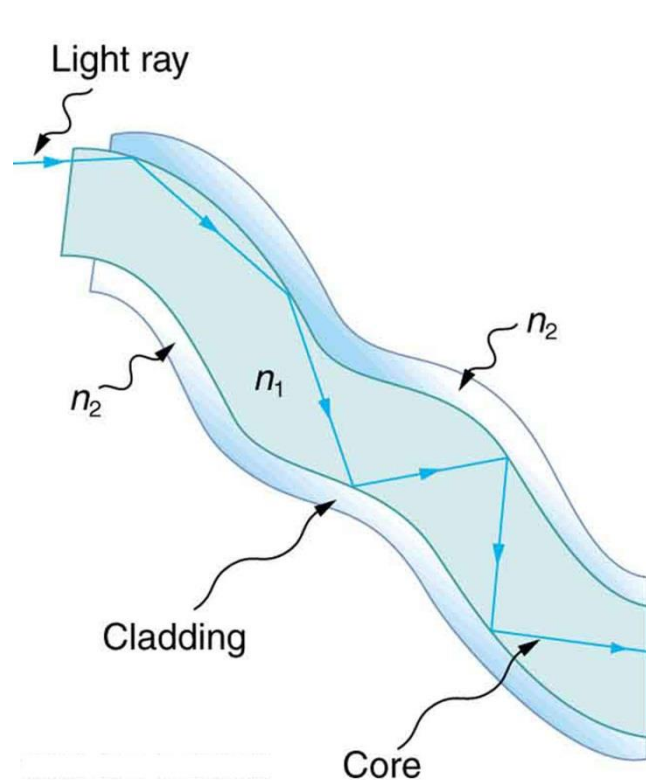
Ένας αποδοτικός τρόπος καθοδήγησης του φωτός είναι χρήσιμος για τις σύγχρονες οπτικές επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων



Οι Καο και Hockham πρότειναν τη χρήση οπτικών ινών για επικοινωνίες - το 1966.
Αυτό το έργο οδήγησε στο βραβείο Νόμπελ Φυσικής (το 2009!).



Για να αναλύσουμε σωστά τον τρόπο διάδοσης του φωτός σε μια οπτική ίνα, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τον ηλεκτρομαγνητισμό. Αλλά μπορούμε να πάρουμε την βασική εικόνα εξετάζοντας τη γεωμετρική οπτική και την έννοια της ολικής εσωτερικής ανάκλασης:



4. Τι ακολουθεί;

Η Φωτονική είναι ένα συναρπαστικό πεδίο και μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες στην ηλεκτρολογία. Με τον ίδιο τρόπο οπού τα ηλεκτρονικά εξελίχθηκαν με τα ολοκληρωμένο κύκλωμα, υπάρχουν πολλές νέες εξελίξεις σε μια περιοχή γνωστή ως ολοκληρωμένη φωτονική.

