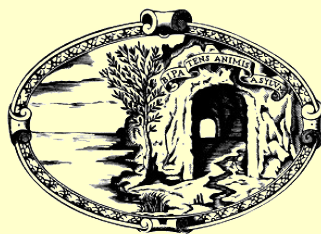


ACCADEMIA GALILEIANA
DI SCIENZE LETTERE ED ARTI IN PADOVA

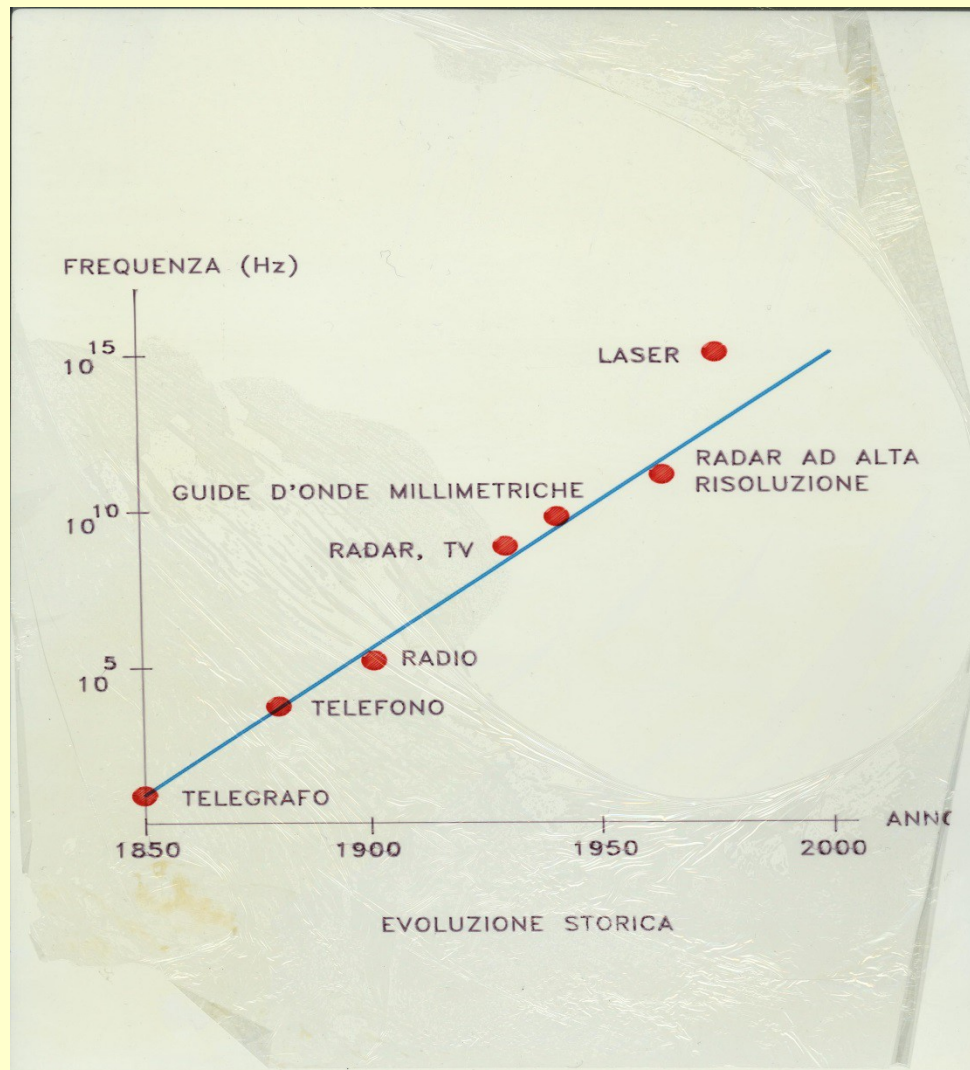


**La nascita inaspettata
e l'avvio travolgente delle
telecomunicazioni su fibra ottica**

**CARLO GIACOMO SOMEDA
UNIVERSITÀ DI PADOVA**

**101° Congresso SIF
Roma, 23 settembre 2015**

L'evoluzione storica delle TLC, come era vista negli anni '80



Uno dei primi esperimenti di collegamento laser in spazio libero:
Torino: Laboratori CSELT – La Maddalena, 1965



Laser He-Ne, 0.5
mW.



Lunghezza del collegamento: 5 km



La ricerca di punta nelle TLC a grande distanza
nei primi anni '60:
trasmissione guidata di onde millimetriche



Per evitare gli ovi inconvenienti della propagazione ottica in atmosfera , si sperimenta la propagazione ottica guidata.

Primi tentativi: anni '60

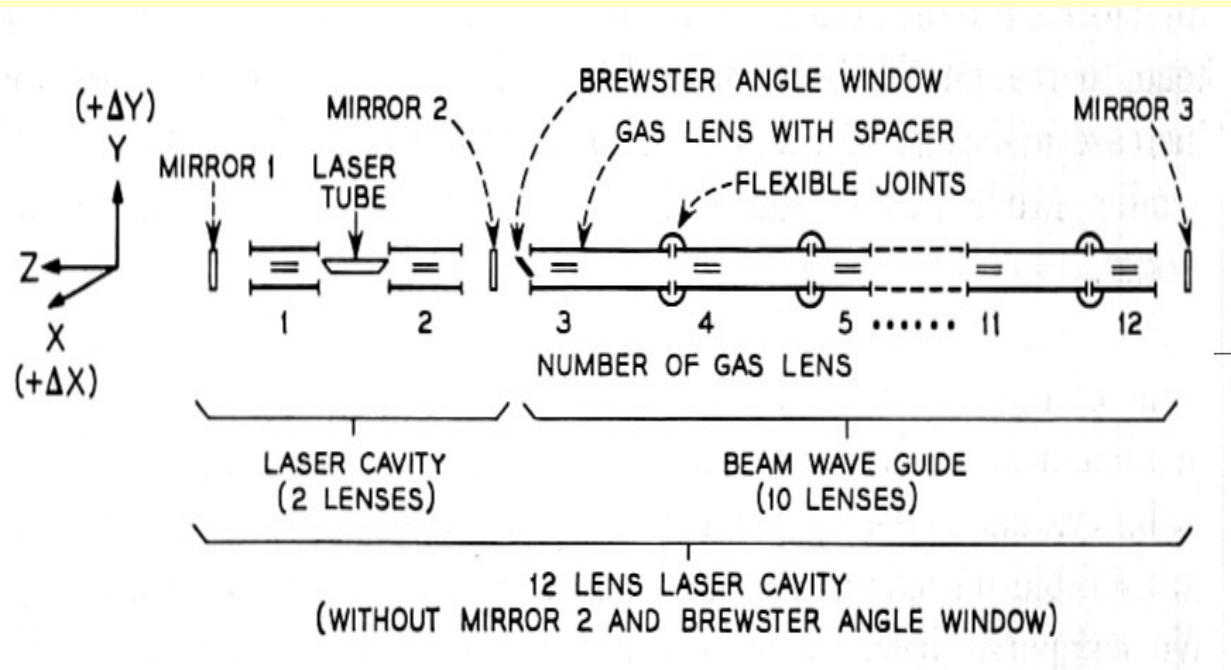


Fig. 1 — Experimental arrangement of beam waveguide.

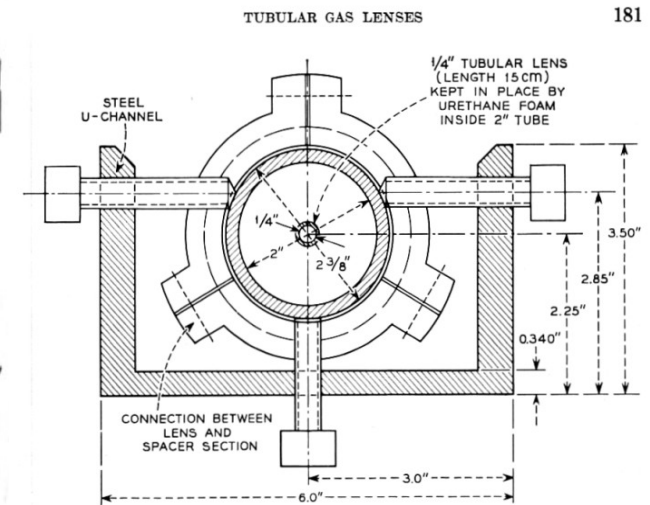


Fig. 2 — Gas lens mounted inside U channel.



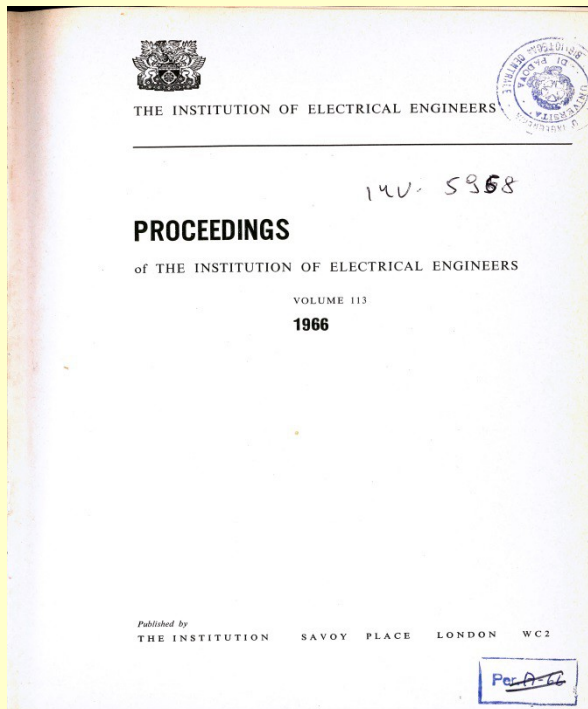
Erano soluzioni molto complicate:
le TLC ottiche sembravano in stallo.
Ma un giovane ingegnere, nato in Cina
ma cittadino britannico, attivo in UK ...



Courtesy BNR Europe.



.... procedeva impavido contro corrente e proponeva l'uso di fibre di vetro, sfidando lo scetticismo dei «saggi» e l'ironia diffusa



Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies

K. C. Kao, B.Sc.(Eng.), Ph.D., A.M.I.E.E., and G. A. Hockham, B.Sc.(Eng.), Graduate I.E.E.

Synopsis

A dielectric fibre with a refractive index higher than its surrounding region is a form of dielectric waveguide which represents a possible medium for the guided transmission of energy at optical frequencies. The particular type of dielectric-fibre waveguide discussed is one with a circular cross-section. The choice of the mode of propagation for a fibre waveguide used for communication purposes is governed by consideration of loss characteristics and information capacity. Dielectric loss, bending loss and radiation loss are discussed, and mode stability, dispersion and power handling are examined with respect to information capacity. Physical-realisation aspects are also discussed. Experimental investigations at both optical and microwave wavelengths are included.

List of principal symbols

- J_n = n th-order Bessel function of the first kind
 - K_n = n th-order modified Bessel function of the second kind
 - β = $\frac{2\pi}{\lambda}$ phase coefficient of the waveguide
 - J_n' = first derivative of J_n
 - K_n' = first derivative of K_n
 - a_1 = radial wave number or decay coefficient
 - ϵ_r = relative permittivity
 - k_z = free-space propagation coefficient
 - a = radius of the fibre
 - γ = longitudinal propagation coefficient
 - k = Boltzmann's constant
 - T = absolute temperature, deg K
 - β_0 = isothermal compressibility
 - λ = wavelength
 - n = refractive index
 - $H_n^{(2)}$ = n th-order Hankel function of the 2nd type
 - $H_n^{(1)}$ = derivation of $H_n^{(2)}$
 - ν = azimuthal propagation coefficient = $\nu_1 - j\nu_2$
 - L = modulation period
- Subscript m is an integer and subscript n refers to the n th root of $J_n = 0$

boundary conditions imposed by the physical structure, the characteristic equations are as follows:

for HE_{1m} modes

$$\frac{\beta^2 J_1' \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right)^2}{k_0^2 \left(a_1^2 + a_2^2 \right)^2} = \frac{\epsilon_1 J_1'(a_1) \epsilon_2 K_1'(a_2)}{a_1 J_1(a_1) + a_2 K_1(a_2)} \times \frac{1}{\left(\frac{1}{a_1} J_1'(a_1) + \frac{1}{a_2} K_1'(a_2) \right)} \quad (1)$$

for E_{0m} modes

$$\frac{\epsilon_1 J_1'(a_1)}{a_1 J_1(a_1)} = \frac{\epsilon_2 K_1'(a_2)}{a_2 K_1(a_2)} \quad (2)$$

for H_{0m} modes

$$\frac{1}{a_1} \frac{J_1'(a_1)}{J_1(a_1)} = \frac{1}{a_2} \frac{K_1'(a_2)}{K_1(a_2)} \quad (3)$$

The auxiliary equations defining the relationship between a_1 and a_2 are

$$\begin{aligned} a_1^2 + a_2^2 &= (k_0 a)^2 (\epsilon_1 - \epsilon_2) \\ a_1^2 &= \gamma^2 + k_0^2 \epsilon_1 \\ -a_2^2 &= \gamma^2 + k_0^2 \epsilon_2 \\ a_1 &= h, a_2 = l \text{ and } 2 \end{aligned}$$

where subscripts 1 and 2 refer to the fibre and the outer region, respectively. All the modes exhibit cutoffs except the HE_{11} mode, which is the lowest-order hybrid mode. If an assume two orthogonal polarisations, and it propagates with an increasing percentage of energy outside the fibre as the dimensions of the structure decrease. Thus, when operating the waveguide in the HE_{11} mode, it is possible to achieve a single-mode operation by reducing the diameter of the fibre sufficiently. Under this condition, a significant proportion of the energy is carried outside the fibre. If the outside medium is of a lower loss than the inside dielectric medium, the attenuation of the waveguide is reduced. With these properties, HE_{11} mode operation is of particular interest. The physical and electromagnetic aspects of the dielectric-fibre waveguide carrying the HE_{11} mode for use at optical frequencies will now be studied in detail. Conclusions are drawn as to the feasibility and the expected performance of such a waveguide for long-distance-communication application.

K. C. Kao and G. A. Hockham, *Proceedings IEE*, Vol. 113, No. 7, pp. 1151-1158, July 1966

NASCITA E AVVIO DELLE TLC SU FIBRA OTTICA
C. G. SOMEDA

ACCADEMIA GALILEIANA
DI SCIENZE LETTERE ED ARTI IN PADOVA



Fu una storia a lieto fine: a Charles Kao venne assegnato il Premio Nobel per la Fisica 2009 “for groundbreaking achievements concerning the transmission of light in fibers for optical communication”.



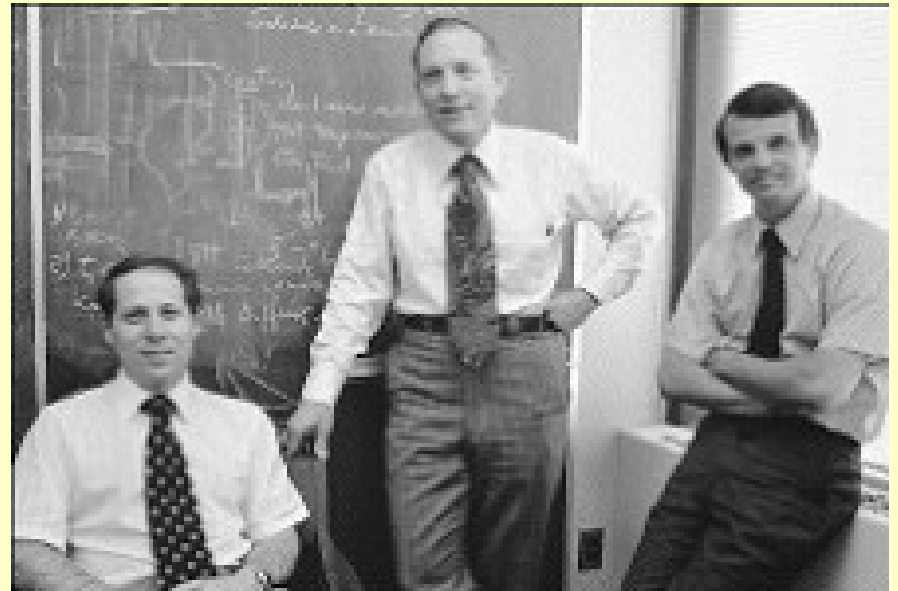
Ma perché, all'inizio, tanto scetticismo?

- Il punto debole della proposta di Kao erano le elevate perdite di potenza nelle fibre di vetro di allora.
- Attenuazioni dell'ordine di **1 dB/m** : metà della potenza iniettata nella fibra era persa dopo 3 metri !
- L'articolo di Kao e Hockham indicava in **20 dB/km** il livello di perdite a cui la fibra sarebbe diventata competitiva.
- Sembrava un traguardo estremamente ambizioso, molto lontano nel tempo.
- Nel 1970, a Londra, un grande convegno internazionale fu interamente dedicato al confronto tra le guide per onde millimetriche e le fibre ottiche.
- Per tre giorni e mezzo, il confronto apparve impari



IL GRANDE «COUP DE THEATRE»

- ... ma, quando la Tavola Rotonda conclusiva del convegno sembrava volgere stancamente al termine, un giovanotto sconosciuto agli oratori chiese la parola e annunciò che
- **CORNING GLASS WORKS aveva prodotto una fibra la cui attenuazione era meno di 20 dB/km !**
- **Il Dream Team:**
 - Don Keck**
 - Bob Maurer**
 - Peter Schultz**



Quale era stata l'arma vincente ?

- **LA CHIMICA: le tecnologie chimiche del vetro tradizionale sono pressoché immutate dalla preistoria ai giorni nostri ...**



Egyptian Glass Cup (XII C. BC)



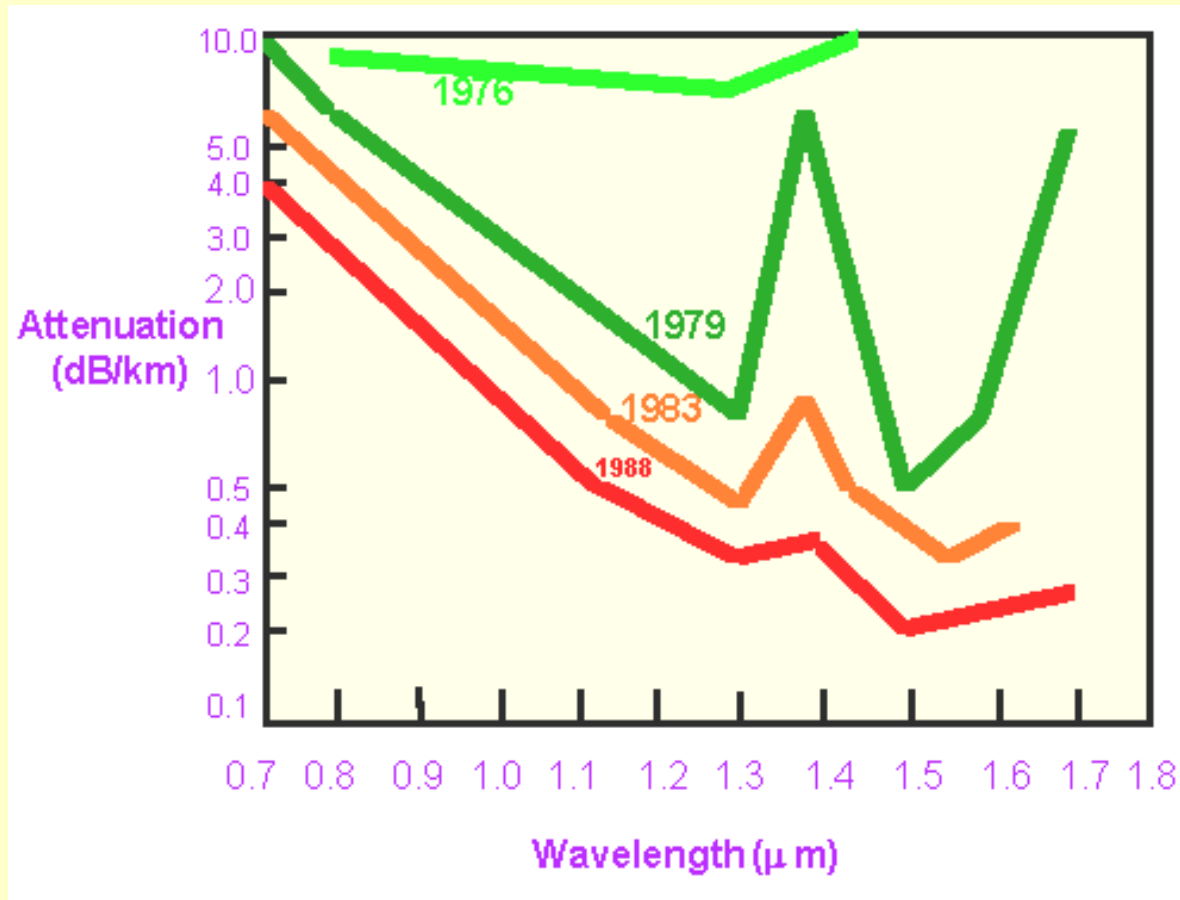
Roman Glass Cup (IV C. BC)



Venetian Crystal Glass (XVI C.)

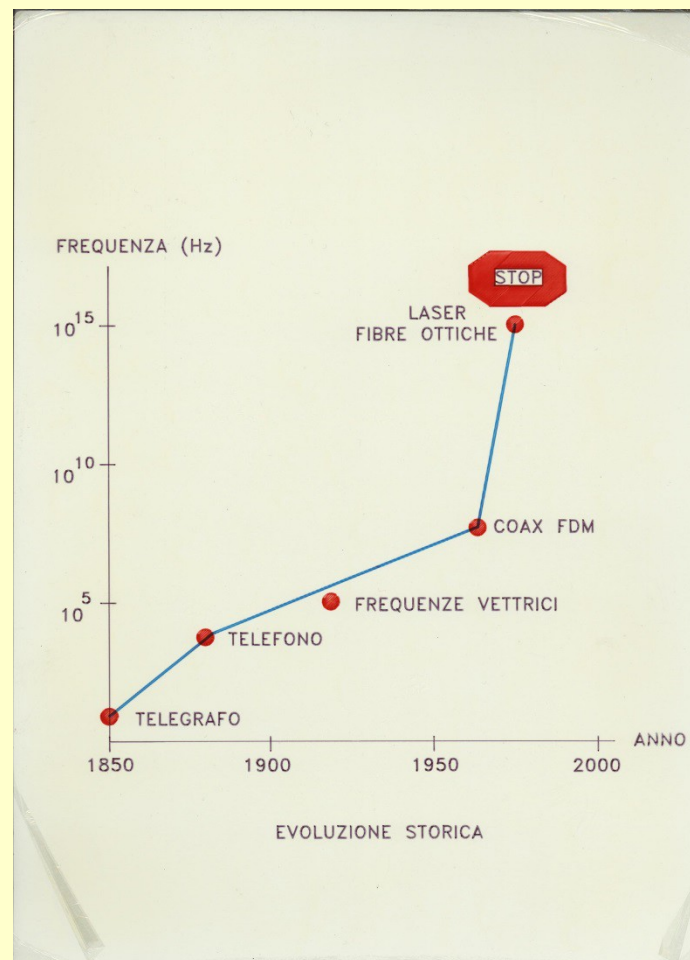
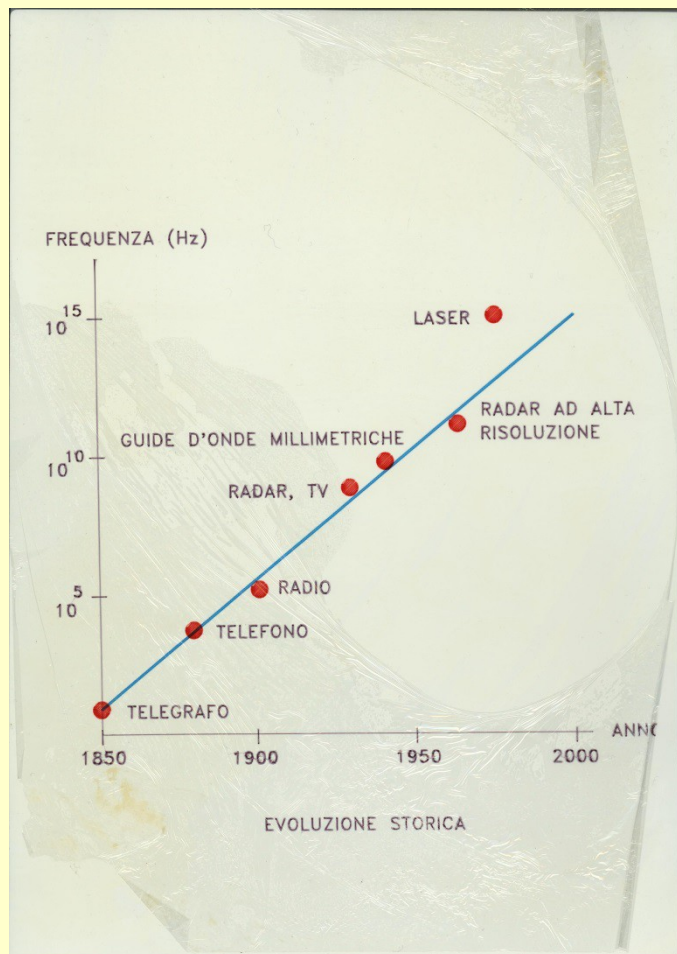


- ... mentre invece il vetro delle fibre ottiche per TLC si produce con le tecnologie dei semiconduttori, ottenendo altissimi livelli di purezza



L'extrapolazione degli anni '80 si dimostrò corretta ?

ASSOLUTAMENTE, NO !



NASCITA E AVVIO DELLE TLC SU FIBRA
OTTICA
C. G. SOMEDA

ACCADEMIA GALILEIANA
DI SCIENZE LETTERE ED ARTI IN PADOVA



Perché ?

Per almeno tre motivi importanti:

-Al crescere della frequenza, cresce il rumore quantico;

-Al di sopra delle frequenze ottiche, non si dispone di materiali trasparenti facili da lavorare e di basso costo;

-Dall'UV in su, le radiazioni elettromagnetiche sono potenzialmente cancerogene.



E allora, che fare ?

- La domanda di capacità trasmissiva a grande distanza continua , nonostante la crisi economica, a crescere impetuosamente
- La via verso frequenze portanti più elevate è molto ardua, forse sbarrata
- **Non rimane che sfruttare la fibra ottica fino all'ultimo bit/(s x Hz x mm²)**

