



Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita

Mario Martinelli

PoliCom

POLItecnico Comunicazioni Ottiche Milano



Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies

K.C. Kao and G.A. Hockham



...Thus, compared with existing coaxial cable and radio systems, this form of waveguide has a larger information capacity and possible advantages in basic material cost. The realisation of a successful fibre waveguide depends, at present, on the availability of suitable low-loss dielectric material. The crucial material problem appears to be one which is difficult but not impossible. Certainly, the required loss figure of around 20 dB/km is much higher than the lower limit of loss figure imposed by fundamental mechanisms.

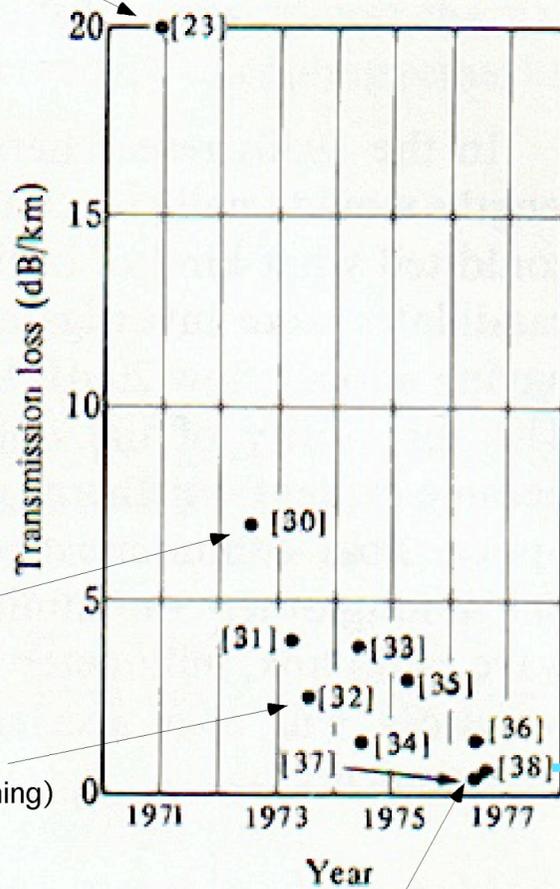
2. K.C. Kao and G.A. Hockham, "Dielectric-Fibre Surface Waveguides for optical frequencies" Proc. IEE, 113, 1151 (1966).



Aspetti storici

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

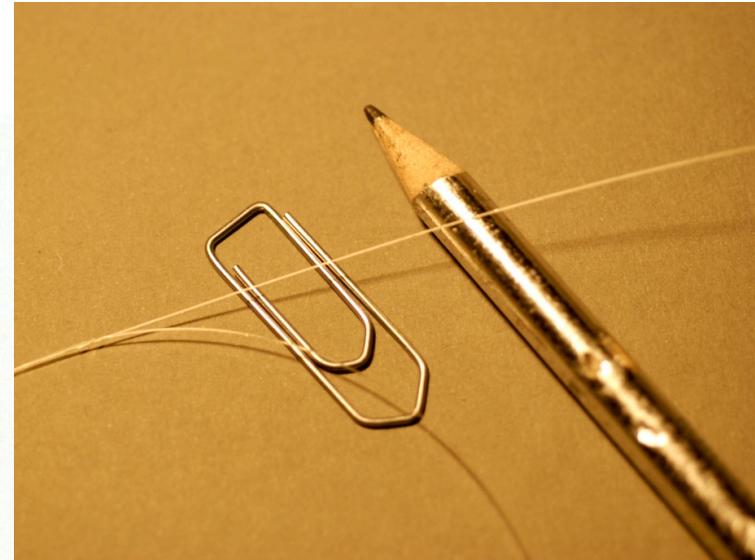
20 dB/Km
1970 Kapron (Corning)



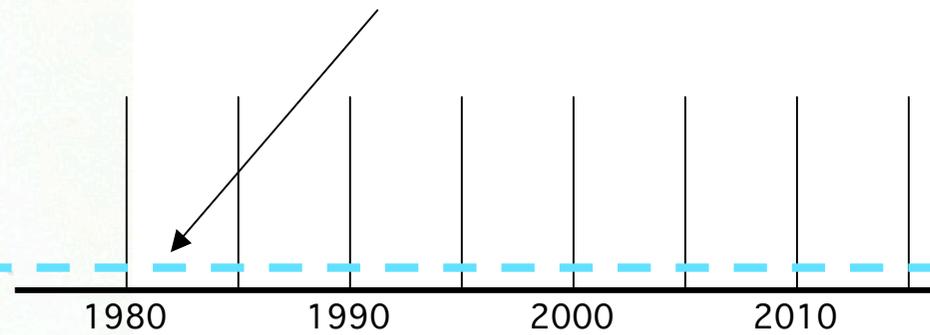
7 dB/Km
Keck 72 (Corning)

2.5 dB/Km
Keck 72 (Corning)

0,47 dB/Km
Horiguchi 76 (Fujikura)



Optical fiber typ att.: 0,2 dB/Km

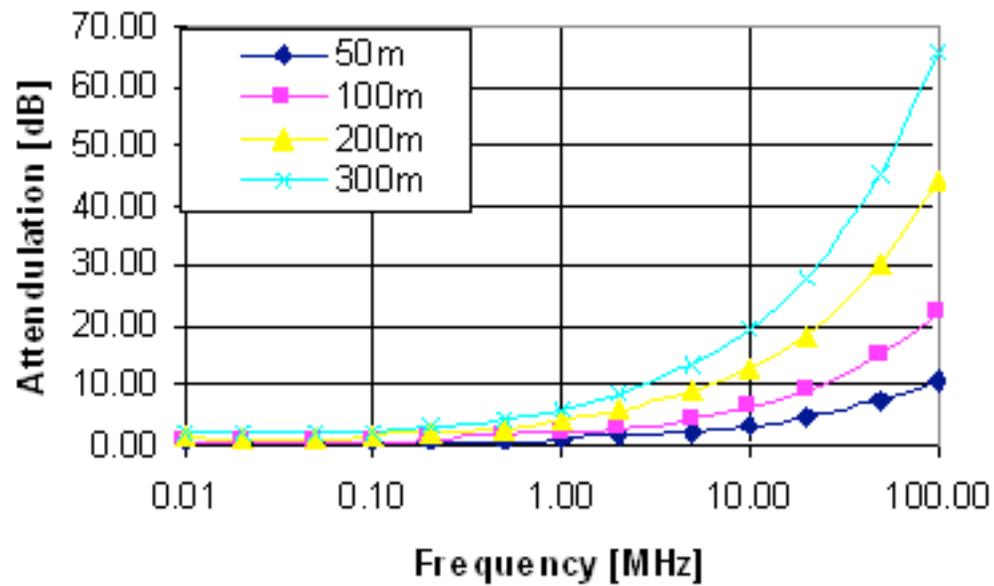




Aspetti storici

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
 Mario Martinelli/2010/Giugno

Cat-5 Cable Attenuation



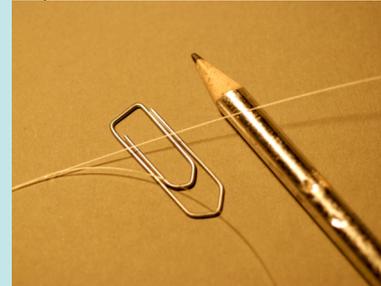
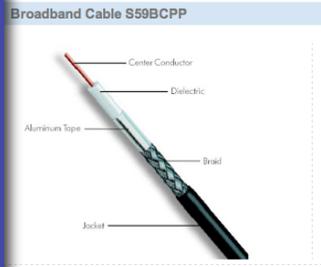
Broadband Cable S59BCPP



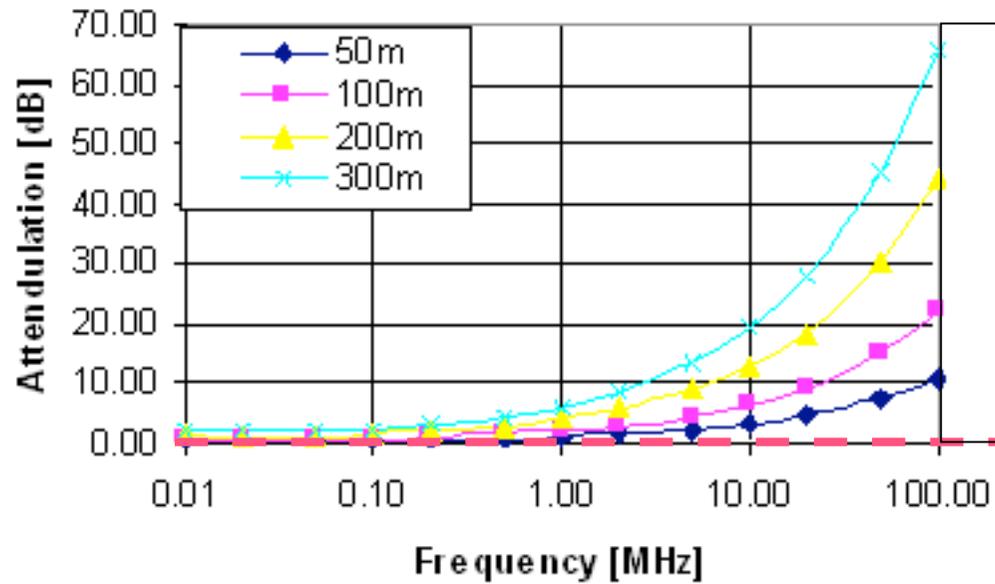


Aspetti storici

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
 Mario Martinelli/2010/Giugno



Cat-5 Cable Attenuation



typ att.: 0,2 dB/Km@any frequency

1000.00
= 1GHz

10GHz

100GHz

1000GHz



Ieri (1990)

nel nucleo di 64 micron quadrati (raggio 4,5 micron)
di in una normale singola fibra ottica
viaggiava una sola portante ottica
(un solo colore)
e trasportava 1 Gb/s di informazione



Ieri (2000)

nel nucleo di 64 micron quadrati (raggio 4,5 micron)
di in una normale singola fibra ottica
viaggiavano contemporaneamente
ed erano contemporaneamente amplificati
per 10000 Km
decine di canali multicolore
ognuno dei quali trasportava
10 Gb/s per un totale
di diverse 100Gb/s di informazione



Oggi (2010)

abbiamo già
la tecnologia per far viaggiare
nel nucleo di 64 micron quadrati (raggio 4,5 micron)
di in una normale singola fibra ottica
contemporaneamente
ed essere contemporaneamente amplificati
per 10000 Km
centinaia di canali multicolore
ognuno dei quali trasporta
100 Gb/s per un totale
di qualche Tb/s di informazione



Oggi (2010)

stiamo mettendo a punto
la tecnologia per far viaggiare
nel nucleo di 64 micron quadrati (raggio 4,5 micron)
di in una normale singola fibra ottica
contemporaneamente
ed essere contemporaneamente amplificati
per 10000 Km
centinaia di canali multicolore
ognuno dei quali può arrivare a trasportare
più di 100 Gb/s per un totale
di decine di Tb/s di informazione



Domani (2020)

verranno estese le finestre spettrali
di amplificazione ottica

verranno estese le tecnologie di efficienza spettrale
e

nel nucleo di 64 micron quadrati (raggio 4,5 micron)
di in una normale singola fibra ottica

viaggeranno contemporaneamente

verranno contemporaneamente amplificati
per 10000 Km

centinaia di canali multicolore

ognuno dei quali potrà arrivare a trasportare

più di Tb/s per un totale

di centinaia di Tb/s di informazione



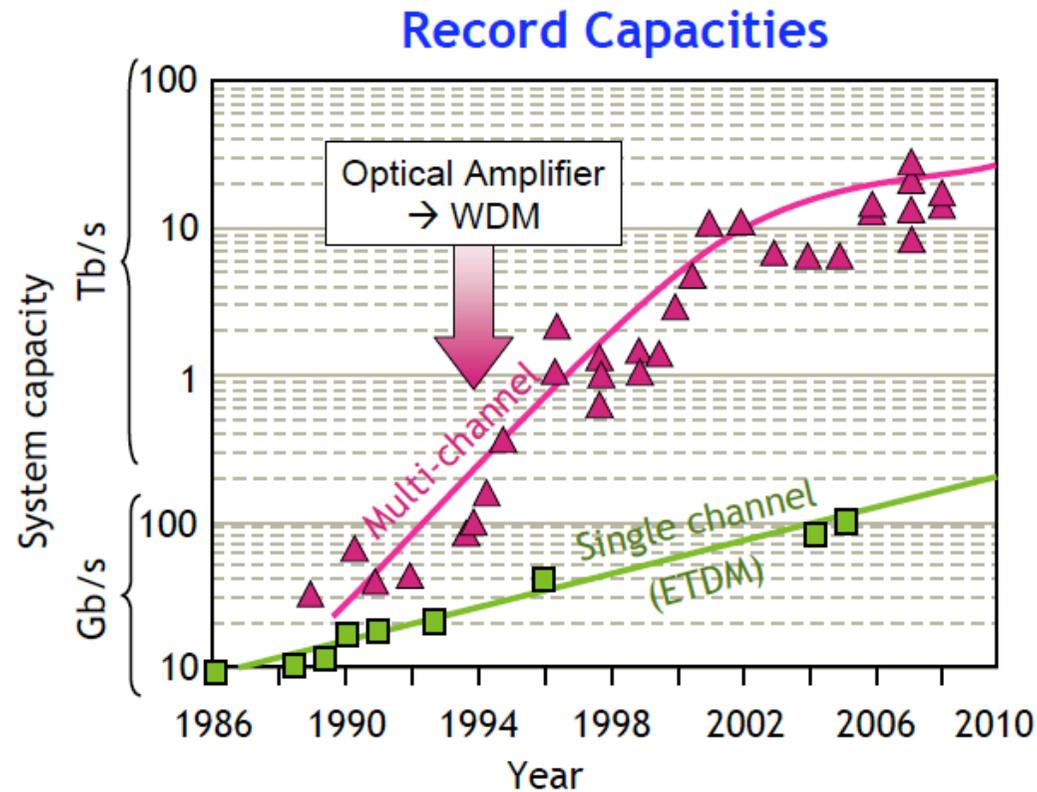
Una risorsa infinita

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

In un mondo dove tutte TUTTE le risorse scarseggiano,
le comunicazioni ottiche sono
oggi
una
RISORSA INFINITA



Historical Evolution of Fiber-Optic Systems Capacity



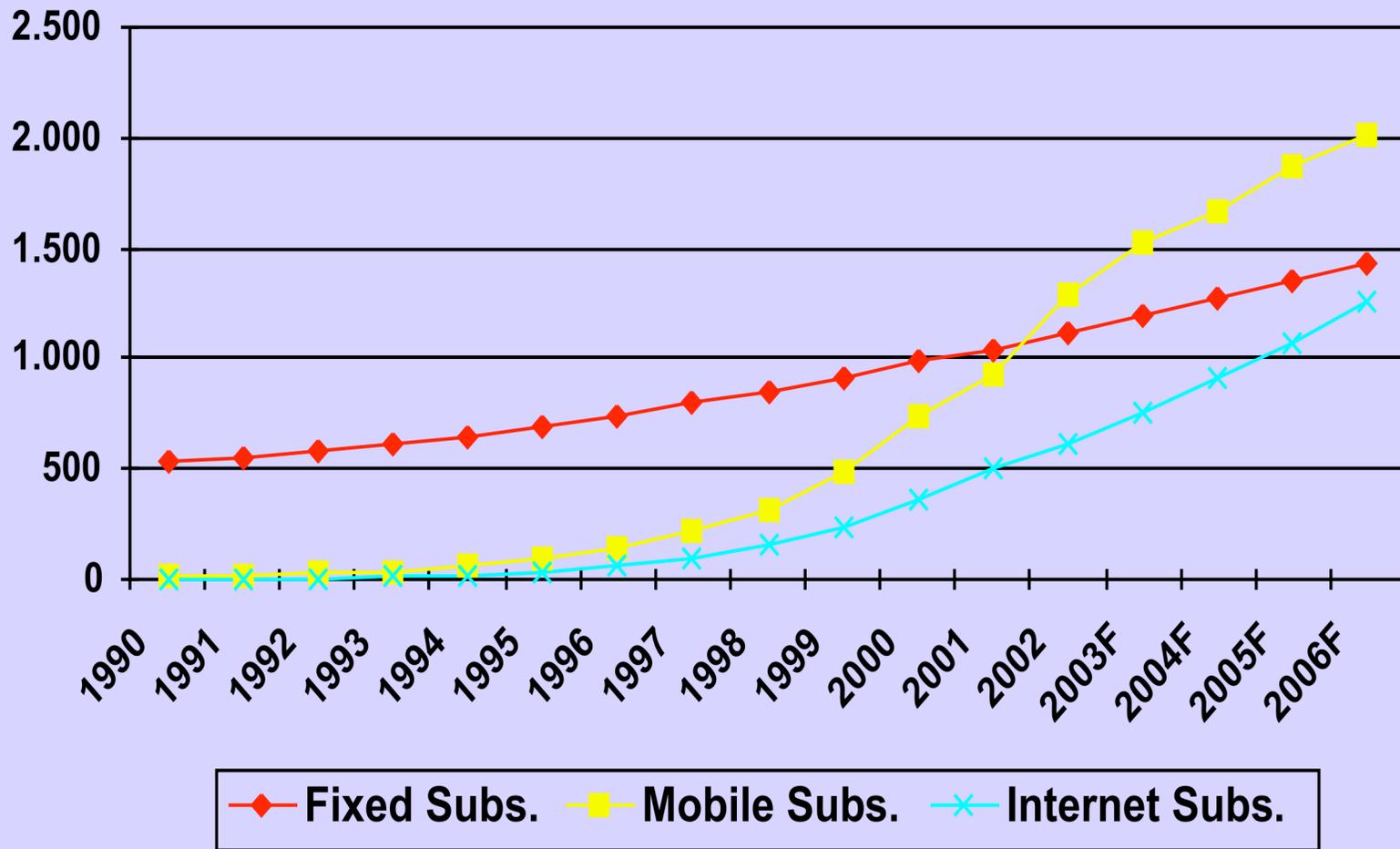
What is the ultimate capacity that a single optical fiber can carry?



Perché tutto questo ?



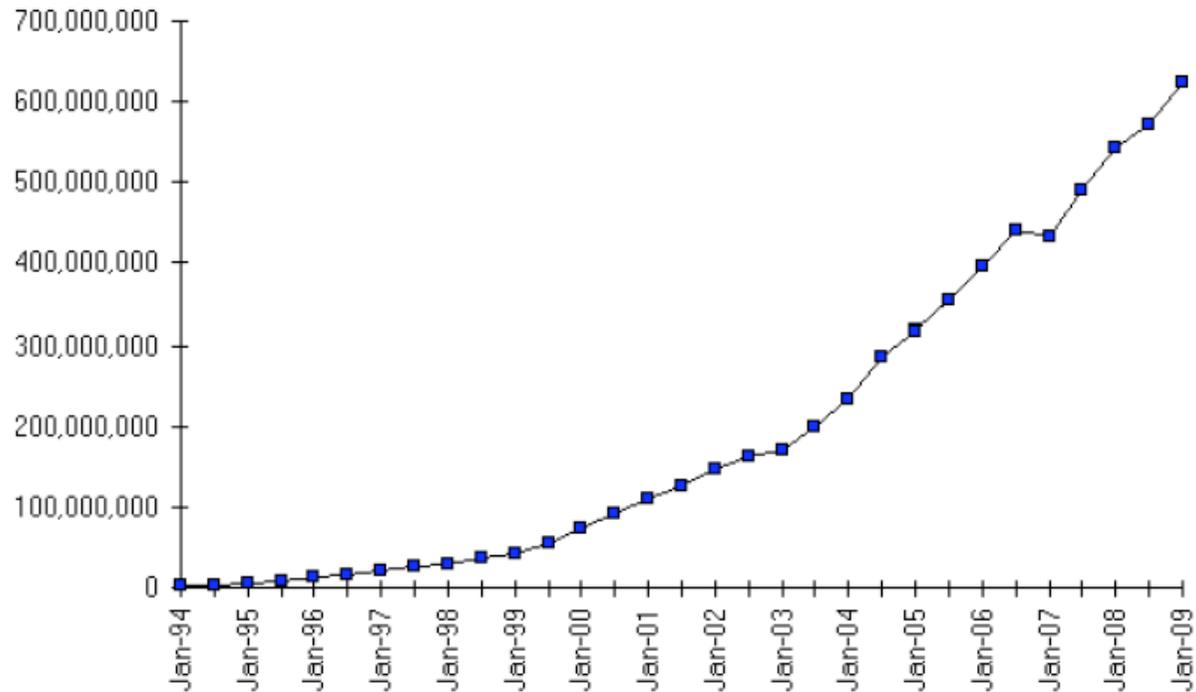
**Subscribers, Worldwide, 1990-2006
 (Million)**





ISC Internet Domain Survey. January 2009

Internet Domain Survey Host Count



Source: Internet Systems Consortium (www.isc.org)

625,226,456 Host Counts ~ 1.5 Billion Internet Users



If the world needs ICT ICT needs bandwidth

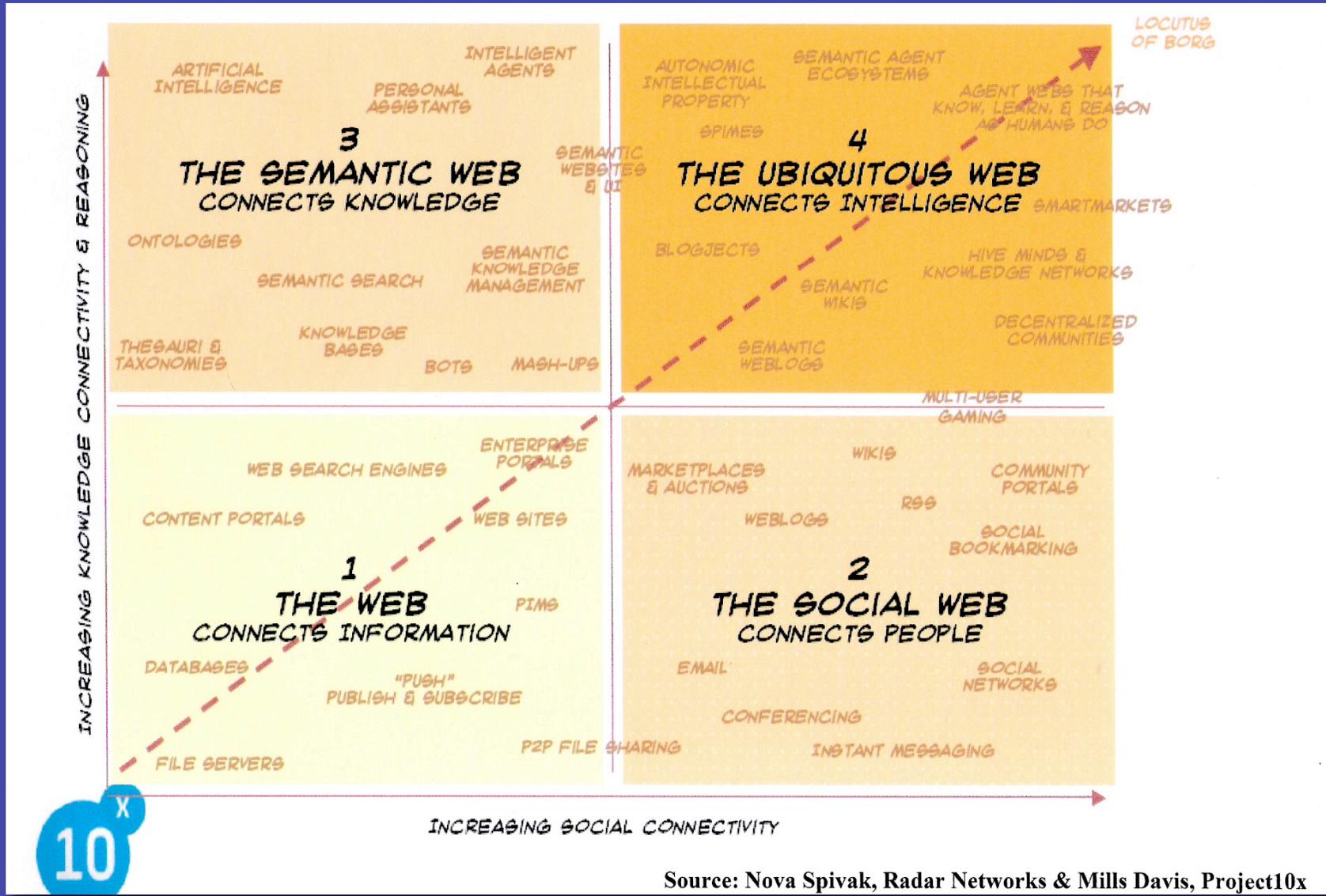
„In 2015 five billion people will be connected permanently via telecommunication networks. The data transport will increase by a factor of 100 compared to 2007“

Simon Beresford-Wylie, CEO NSN,
Die Welt, April 7th,2007



Crescita delle Telecomunicazioni

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita.
Mario Martinelli/2010/Giugno





THE INTERNET OF THINGS

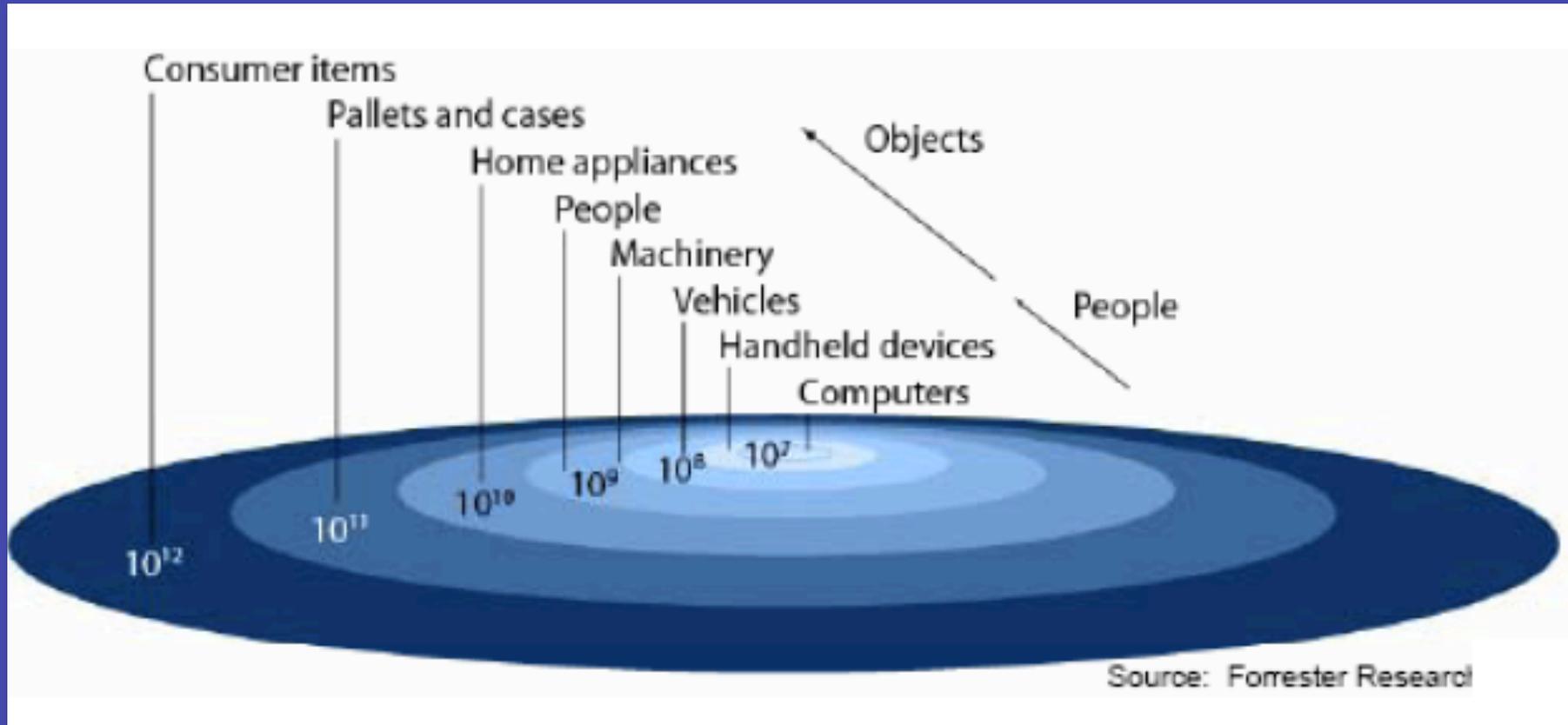
“The next logical step in the technological revolution connecting people anytime, anywhere is to connect inanimate objects. This is the vision underlying the **Internet of things: anytime, anywhere, by anyone and anything**” – ITU, November 2005





Crescita delle Telecomunicazioni

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno





La domanda è: su quali tecnologie si regge tutto questo ?

Cosa c'è sotto tutto ciò, qual è in altri termini qual'è
la risorsa a cui
stiamo attingendo ?



Sat

Feb 2
2008

Failure Happens: Transcontinental fiber-optic submarine cables

by Jesse Robbins | comments: 9

listen

The Guardian published a summary of the ongoing impact from the [transcontinental fiber-optic submarine cable cuts](#) along with a map from [Telegeography.com](#):

“According to reports, the internet blackout, which has left 75 million people with only limited access, was caused by a ship that tried to moor off the coast of Egypt in bad weather on Wednesday. Since then phone and internet traffic has been severely reduced across a huge swath of the region, slashed by as much as 70% in countries including India, Egypt and Dubai. [...]

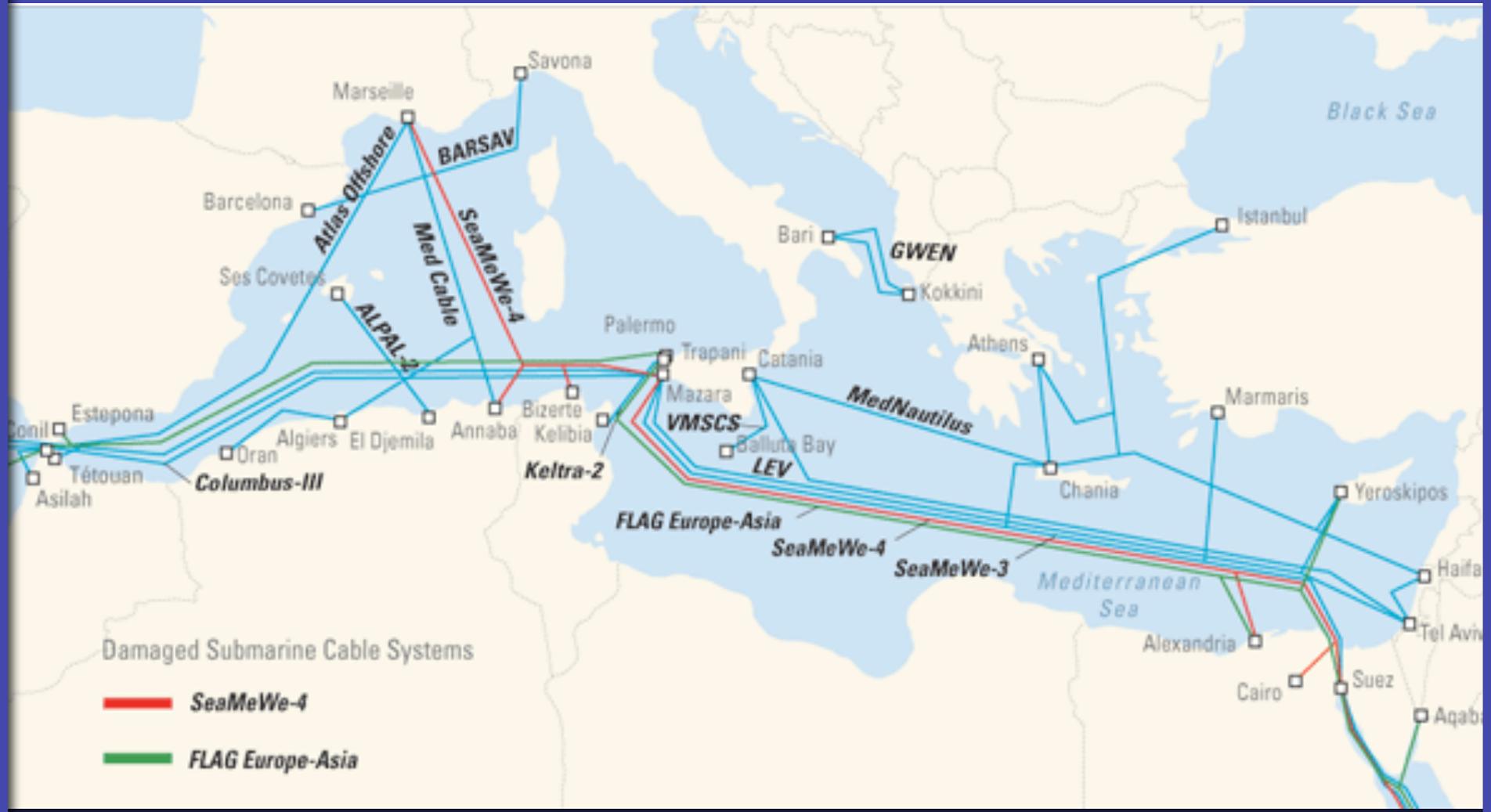
"It will depend on how bad the damage is, but they'll find the sections in question and bring them up onto a ship for repair before sinking them again," said Mauldin. "It could take a week or possibly two weeks."

The fibre optic wires in question - called Flag Europe-Asia and Sea-Me-We 4 - are some of the most vital information pipelines between Europe and the east. The latter, which runs in an uninterrupted line from western Europe to Singapore, had only recently been opened after a mammoth ~£500m, three-year installation project. Between them, the two lines are responsible for around 75% of all connectivity in the Middle East and south Asia.



Crescita delle Telecomunicazioni

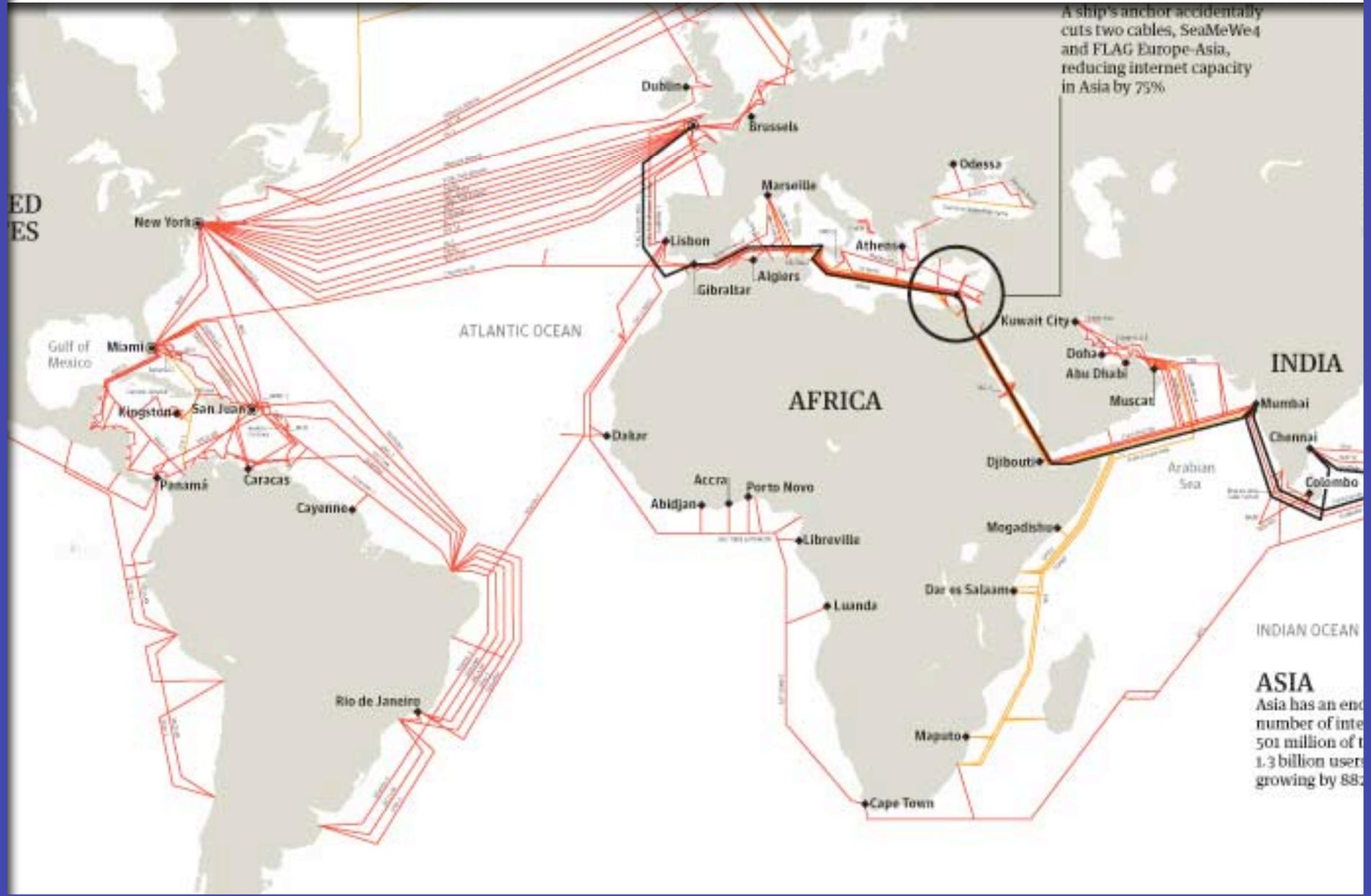
Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita.
Mario Martinelli/2010/Giugno





Crescita delle Telecomunicazioni

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno





Crescita delle Telecomunicazioni

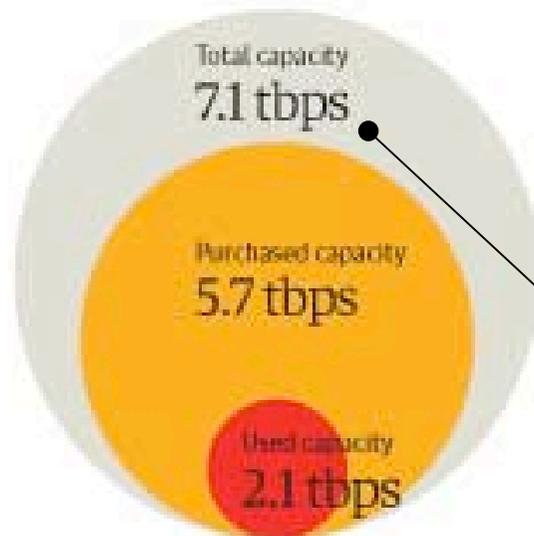
Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
 Mario Martinelli/2010/Giugno

World cable capacity

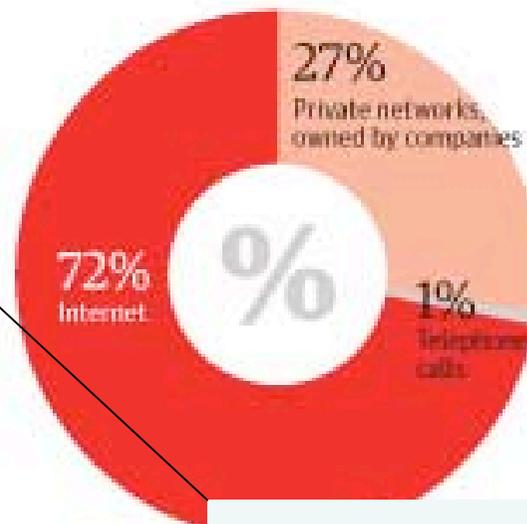
Submarine cable operators light (turn on) capacity on their systems to sell bandwidth to other carriers. Carriers buy extra capacity, mainly to hold in reserve. On the trans-Atlantic route 80% of the bandwidth is purchased, but only 29% is used

Anni	Numero circuiti telefonici		
	regione dell'oceano Atlantico	regione dell'oceano Pacifico	regione dell'oceano Indiano
1970	1486	975	302
1974	4556	2779	1300
1978	7915	4761	2273
1982	13665	8183	3938

Capacity in terabytes a second



What makes up "used capacity"?



Equivalenti a 220 Milioni di telefonate



Le Telecomunicazioni

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

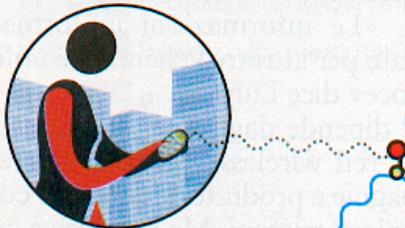
Dove sono le comunicazioni ottiche...



Come WAP vi po

Il Wireless Application Protocol
le modalità di accesso al World

- 1 Una persona con un telefono
l'indirizzo di un sito Web sul ta
del telefono (*keypad*). Il micro
poi la richiesta sotto forma di



- 5 Il docum
al telefo
Il micro
riceve il
il testo s
del telef

Il mondo dell'ottica
comincia appena

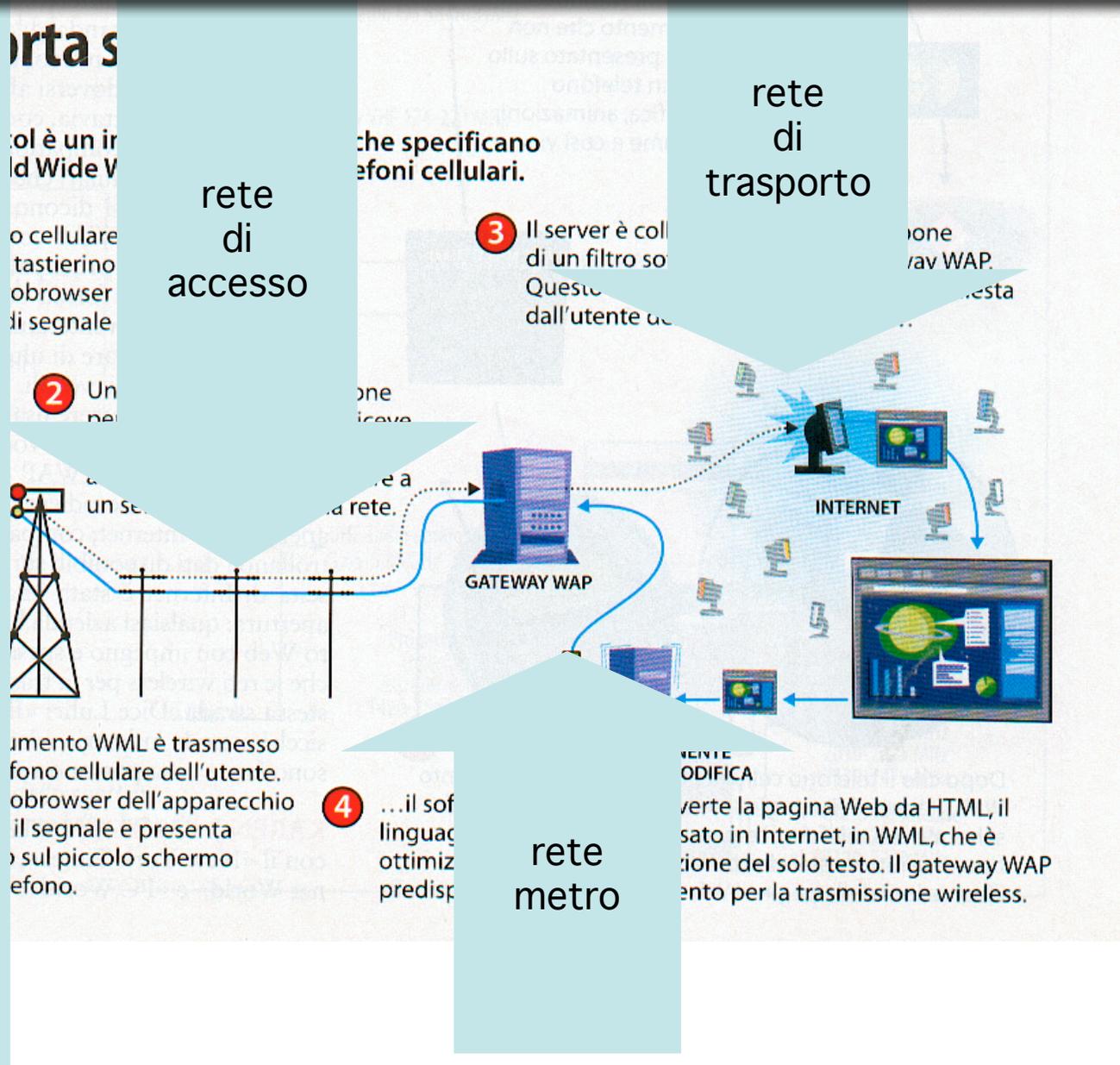
la quantità di informazione
e
la distanza trasmissiva
diventano significative



Le Telecomunicazioni

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita.
Mario Martinelli/2010/Giugno

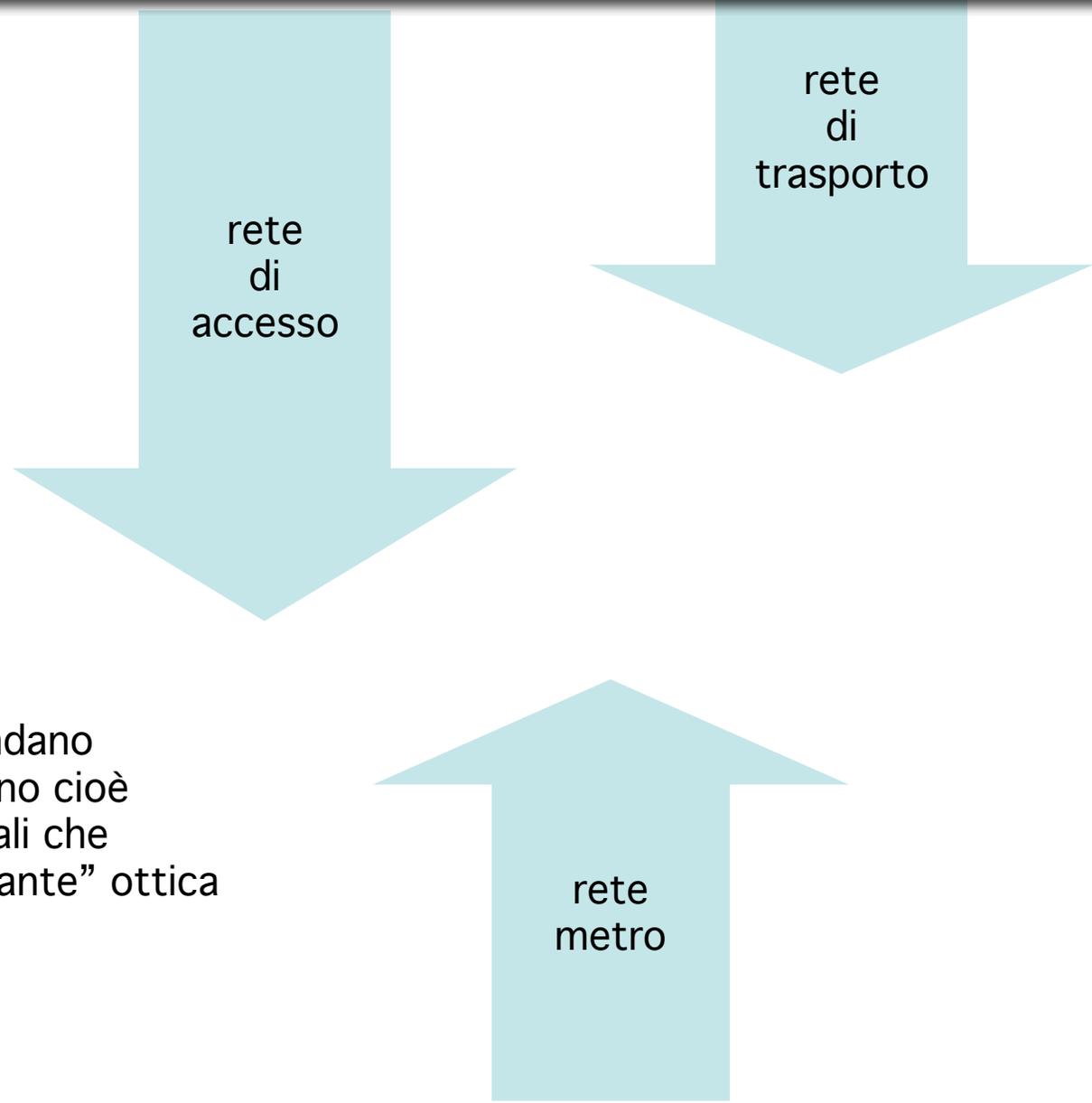
Il mondo dell'ottica comincia appena la quantità di informazione e la distanza trasmissiva diventano significative





Le Telecomunicazioni

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno



tutte le principali
“reti” che ci circondano
sono “ottiche”, sono cioè
costituite da segnali che
viaggiano su “portante” ottica



Le Telecomunicazioni

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

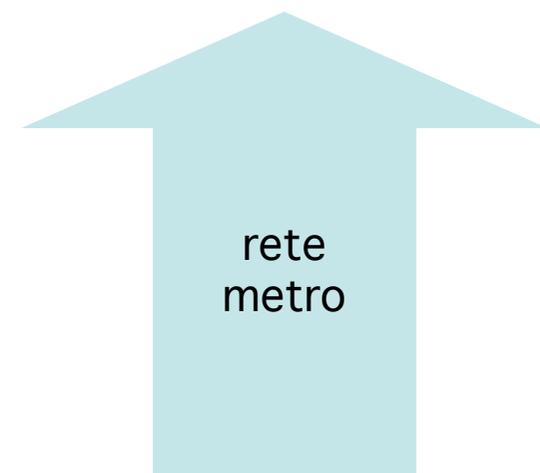
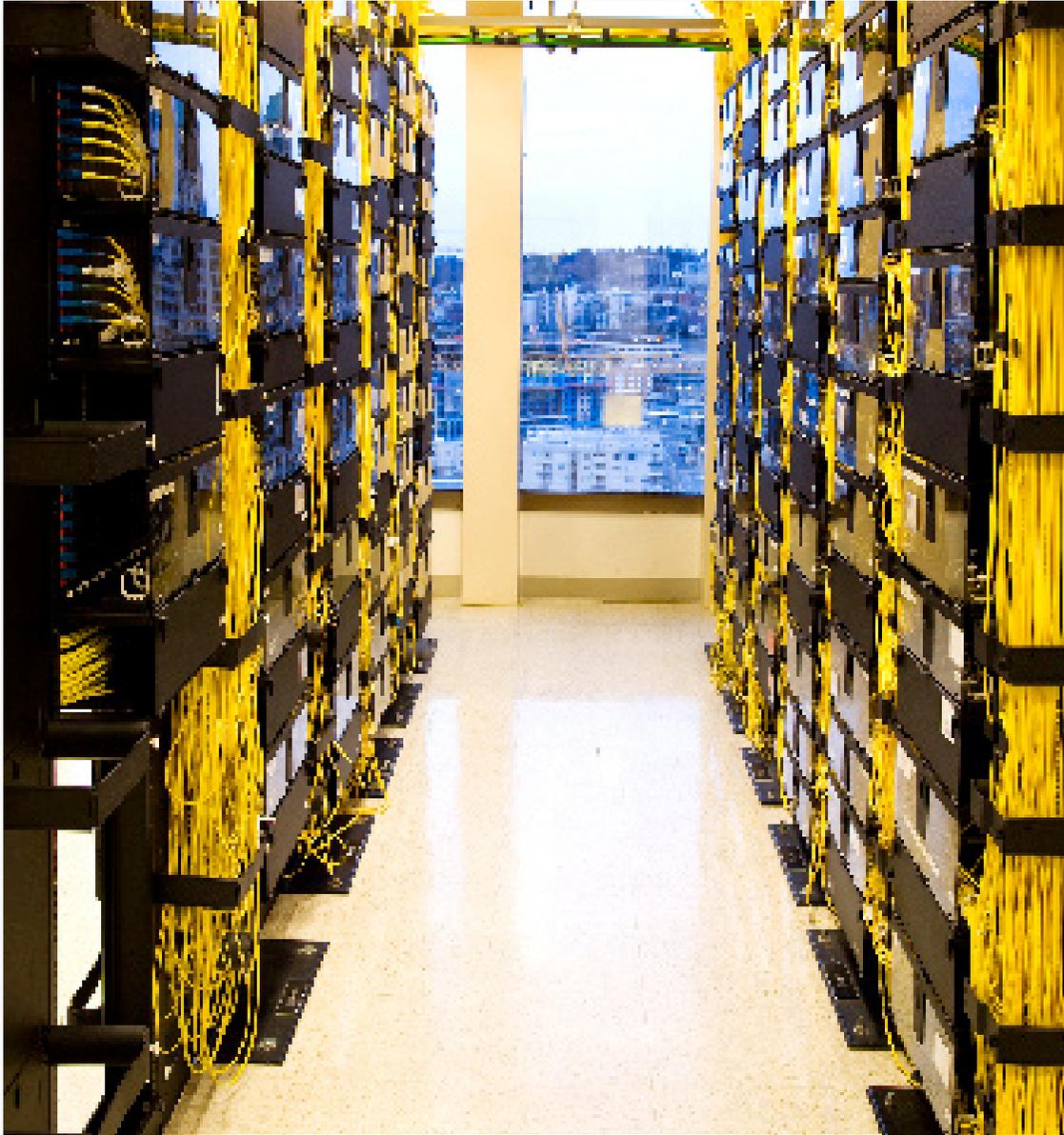


rete
di
trasporto



Le Telecomunicazioni

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita.
Mario Martinelli/2010/Giugno





Le Telecomunicazioni

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno



rete
di
accesso



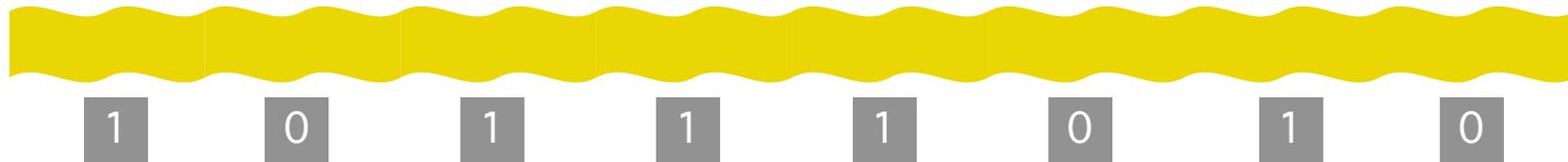
Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

l'informazione per essere trasmessa ha bisogno di un mezzo fisico: l'aria, nel caso del suono, la corrente elettrica, nel caso del telefono con i fili, le onde elettromagnetiche, nel caso della radio e del cellulare, la luce nel caso delle comunicazioni ottiche:

aria, corrente elettrica, onde elettromagnetiche, luce sono portanti.

l'informazione viene trasmessa "modulando" queste portanti, cioè generando variazioni di intensità o ampiezza o fase o frequenza di queste portanti



tutte le principali
"reti" che ci circondano
sono "ottiche", sono cioè
costituite da segnali che
viaggiano su "portante" ottica



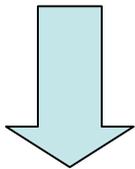
questa modulazione di “portante” costituisce il “codice” secondo cui noi trasmettiamo informazione: nell’esempio fatto il codice è “binario” cioè presenta solo due stati: 1 e 0: con il codice binario si possono scrivere numeri di qualsiasi complessità e quindi trasmettere qualsiasi informazione: oggi tutta l’informazione trasmessa viene resa un numero e poi codificata in BIT, cioè Binary Unit: in altri termini si dice che tutte le reti sono “digitali”



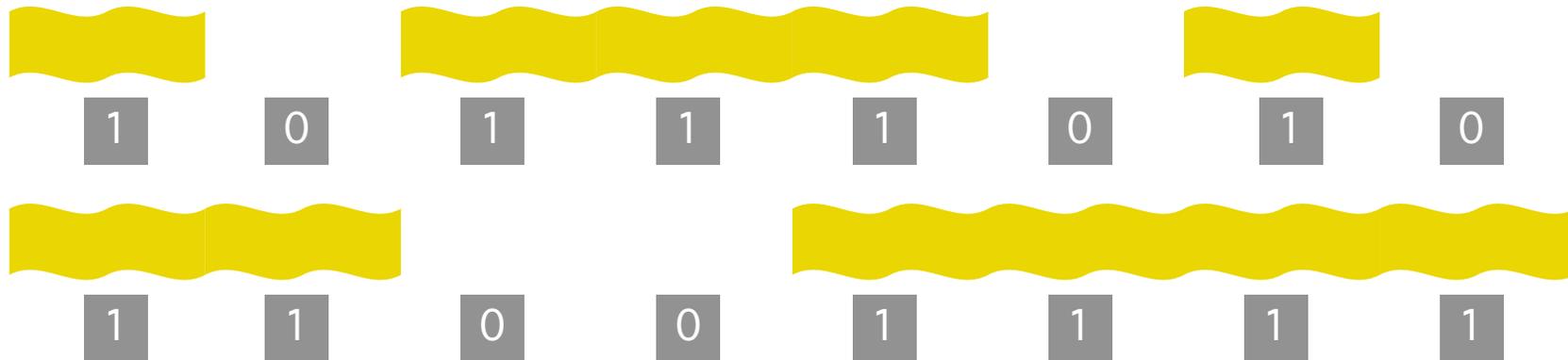
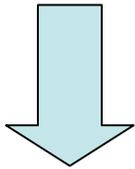
Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

informazione

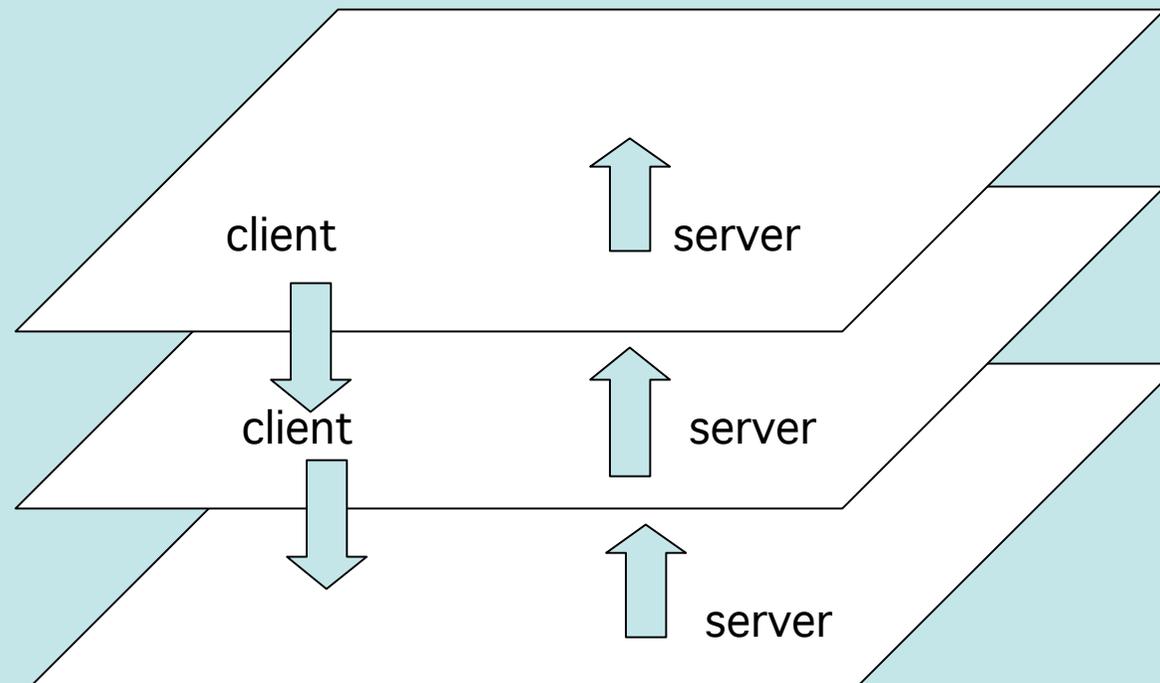


1784





dal punto di vista “logico”
il mondo delle comunicazioni è strutturato in “piani” e ogni
“infrastruttura” di telecomunicazioni “ appoggia” sul piano
sottostante che diventa piano del “server” e si rende disponibile
a fare da server al piano sovrastante, che diventa “client”

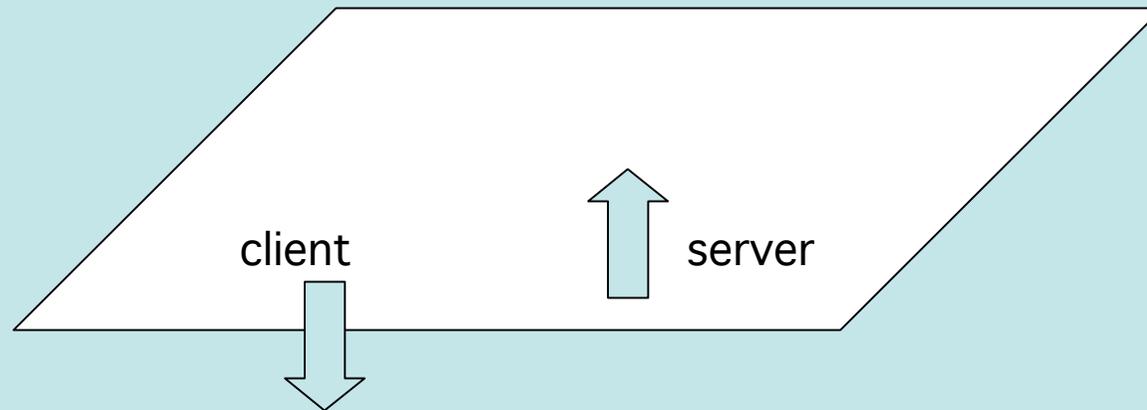




Le Comunicazioni Ottiche

ognuno di questi “piani” è costituito da un flusso di “bit”, cioè di informazione codificata in sequenze digitali: all'interno di ogni “piano” le regole di codifica sono diverse perché diverse sono le funzioni che ogni piano presiede:
c'è il piano che contiene l'indirizzo a cui l'informazione deve andare,
c'è il piano che contiene l'informazione su come raggiungere l'indirizzo,
c'è il piano che contiene l'informazione sullo stato della strada per andare all'indirizzo,
c'è il piano sostiene tutte queste informazioni.

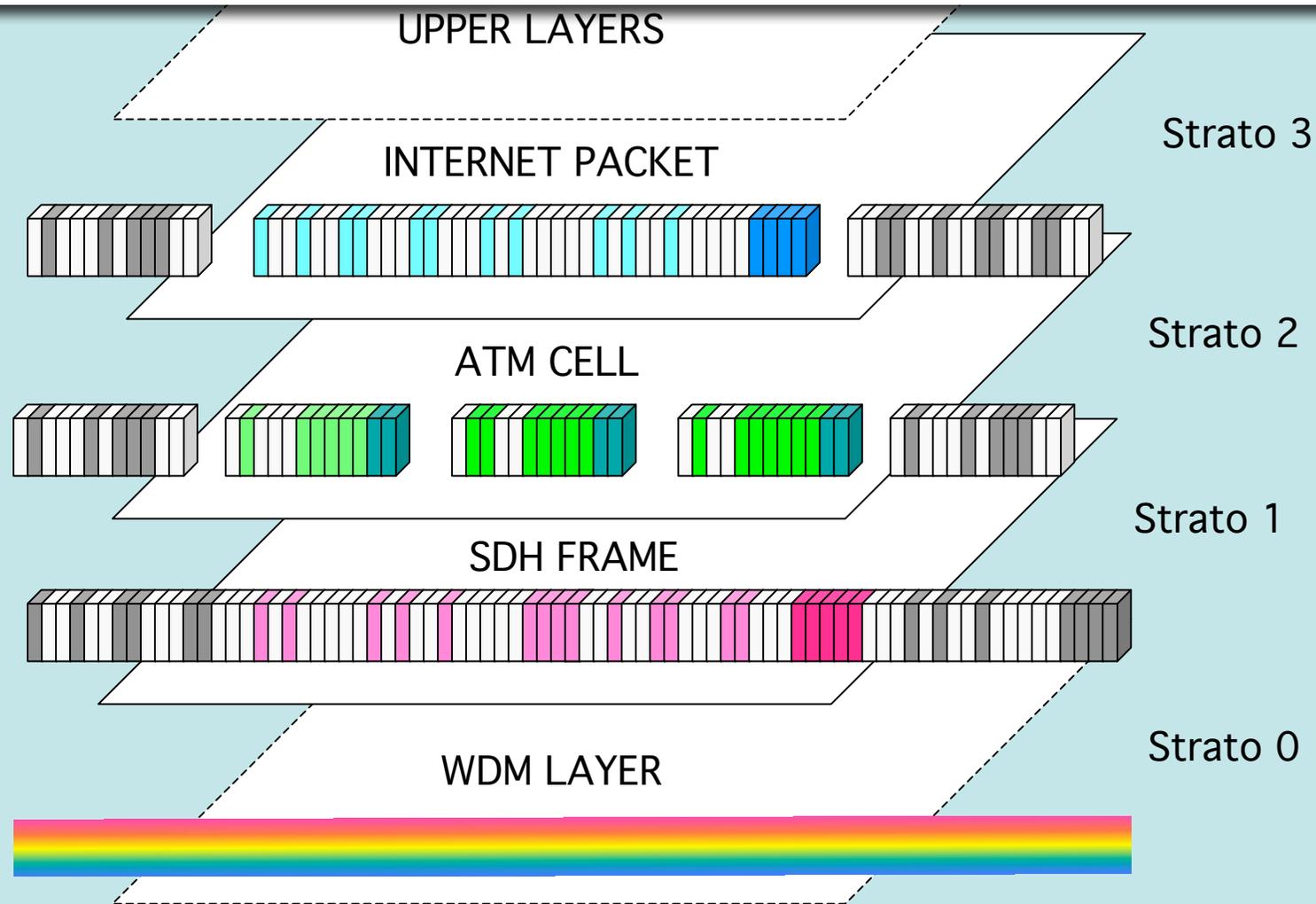
l'insieme di queste regole costituisce il “protocollo”:





Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno



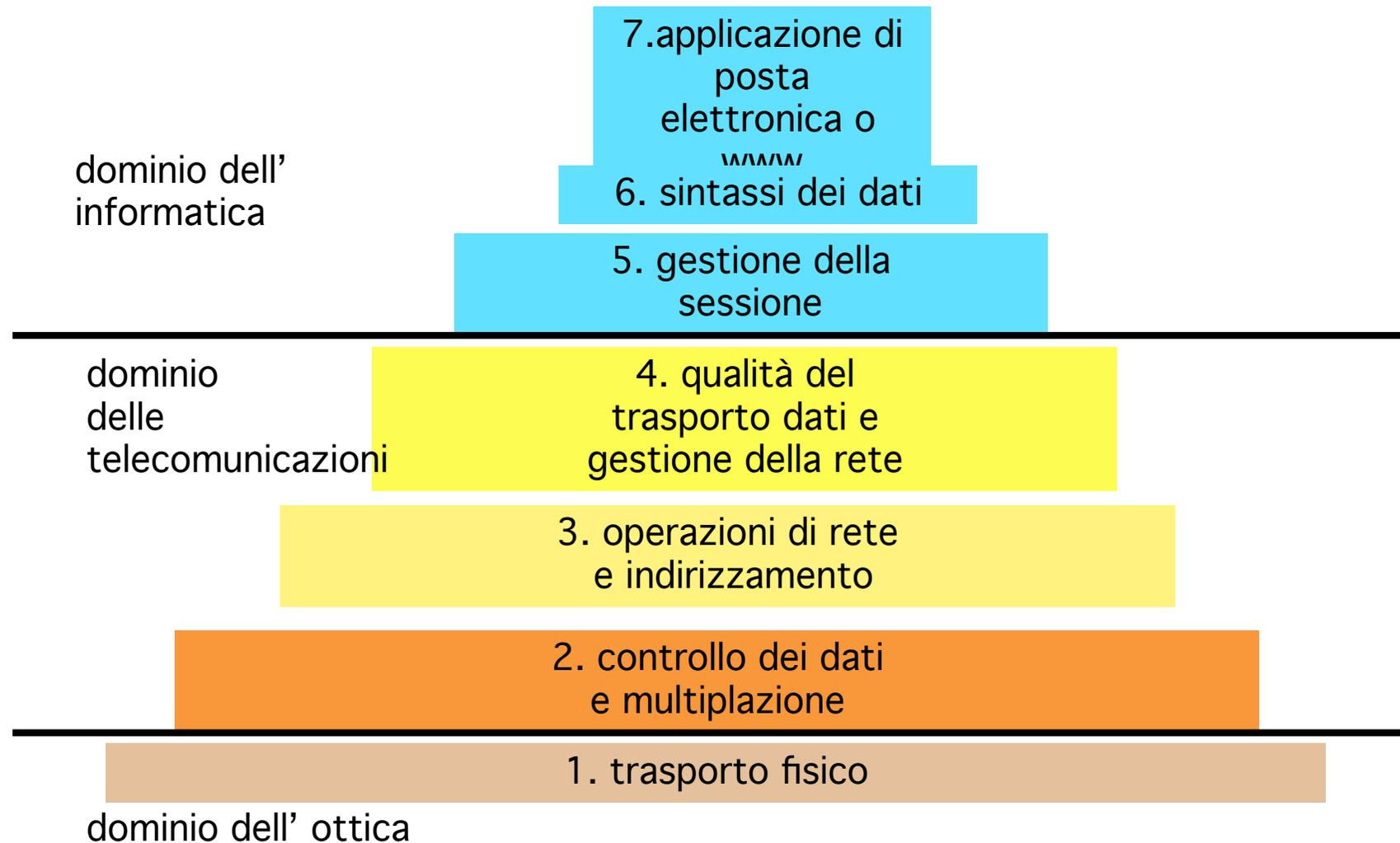
le comunicazioni ottiche sono il "server" di tutti gli altri piani e non sono il "client" di nessuno



Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

I moderni servizi di telecomunicazioni prevedono sino a 7 strati (protocolli) necessari per sostenere l'applicazione finale vista dal cliente e garantire il corretto funzionamento della stessa





Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

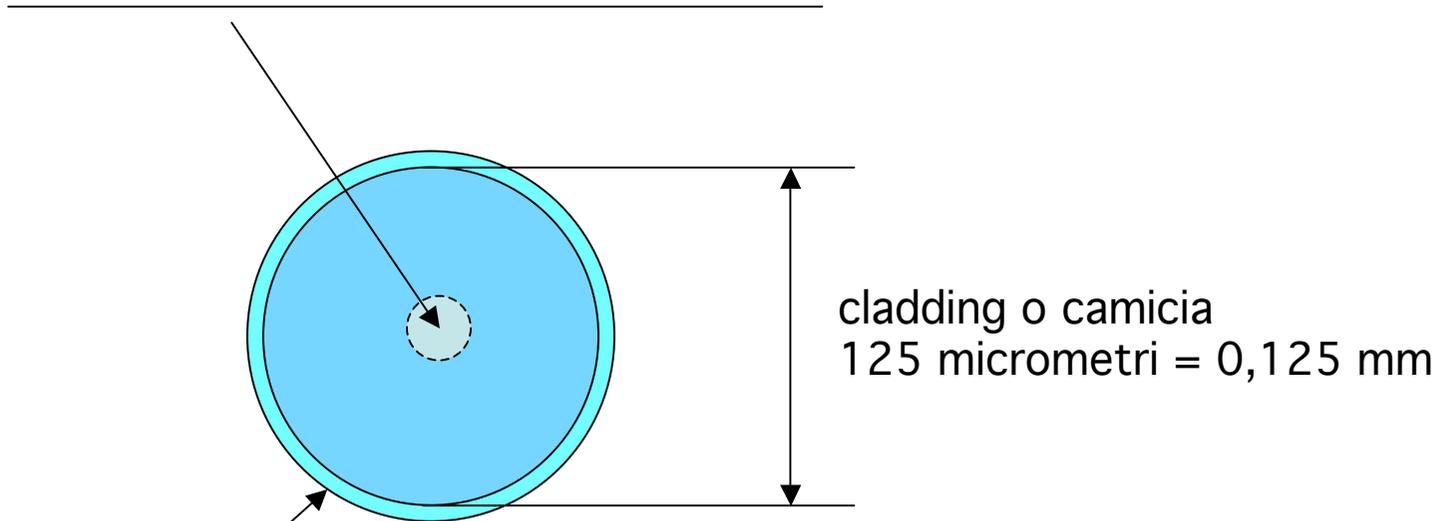
Come propaga la luce nelle fibre ottiche...



Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

core o nucleo
9 micrometri = 0,009 mm di diametro
64 micrometri quadrati di area



coating o rivestimento
10 micrometri di spessore

cladding o camicia
125 micrometri = 0,125 mm

...consideriamo una sezione di fibra ottica...

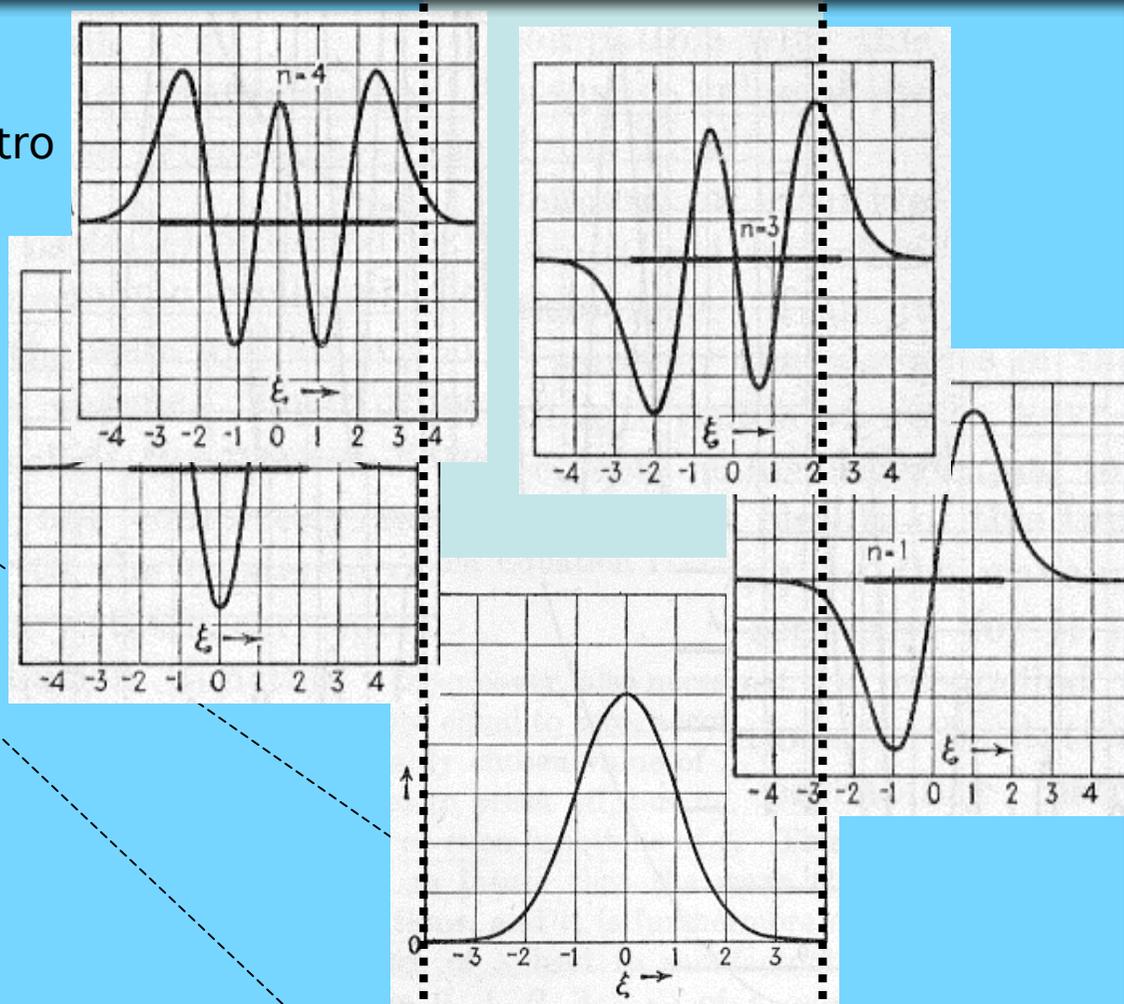


Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita.
Mario Martinelli/2010/Giugno

core o nucleo
9 micrometri = 0,009 mm di diametro
64 micrometri quadrati di area

la luce propaga in fibra ottica secondo "modi" trasmissivi che sono distribuzioni discrete ed ordinate di campo elettromagnetico



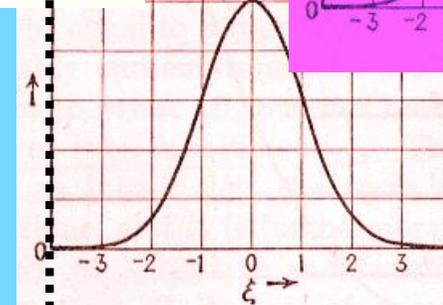
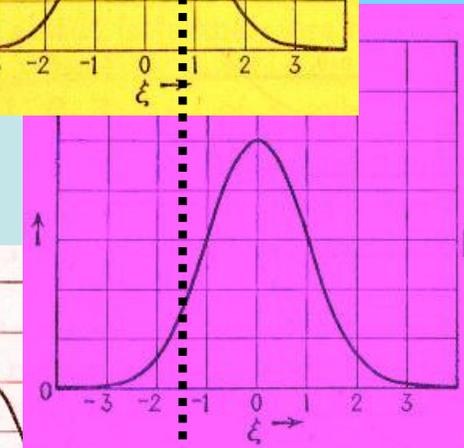
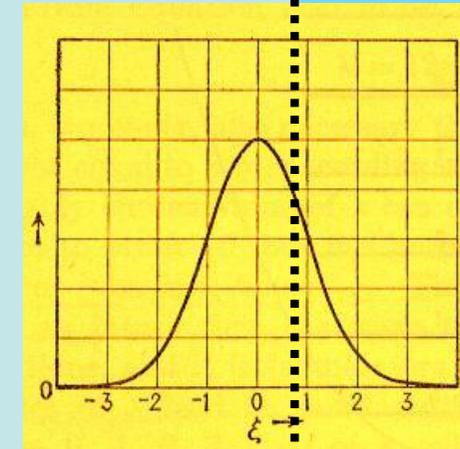
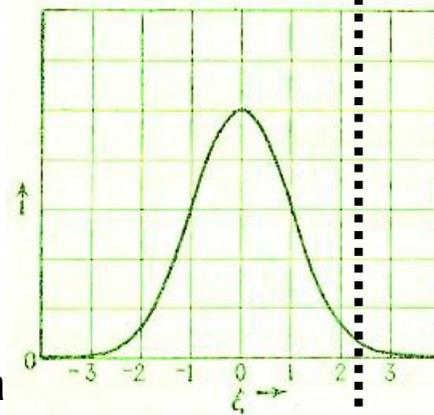
9 micrometri



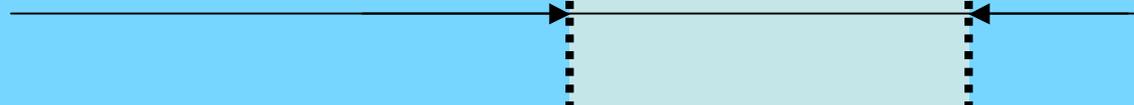
Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita.
Mario Martinelli/2010/Giugno

le fibre ottiche che costituiscono la rete di trasporto mondiale propagano la luce secondo un solo modo: esse sono monomodo alla lunghezza d'onda di 1,5 micron e più del 90% dell'intensità luminosa sta confinata dentro le pareti del cilindro di "core" cioè in un' area di poco più di 60 micron quadrati. In questo nucleo propagano tutte le portanti ottiche permesse dai moderni sistemi wdm: anche centinaia e migliaia di diverse lunghezze d'onda ovvero diversi "colori".



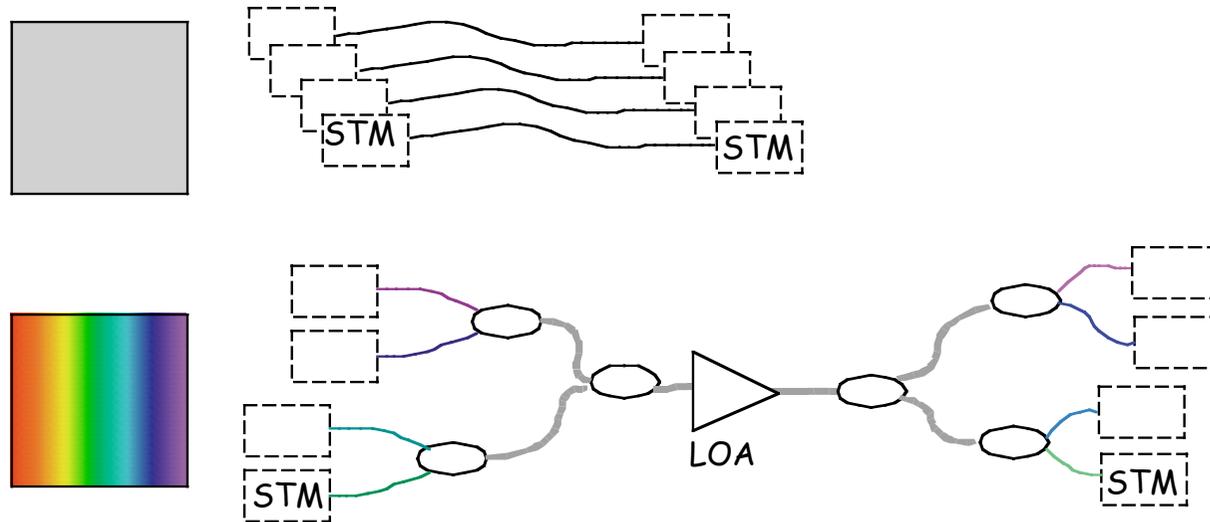
9 micrometri



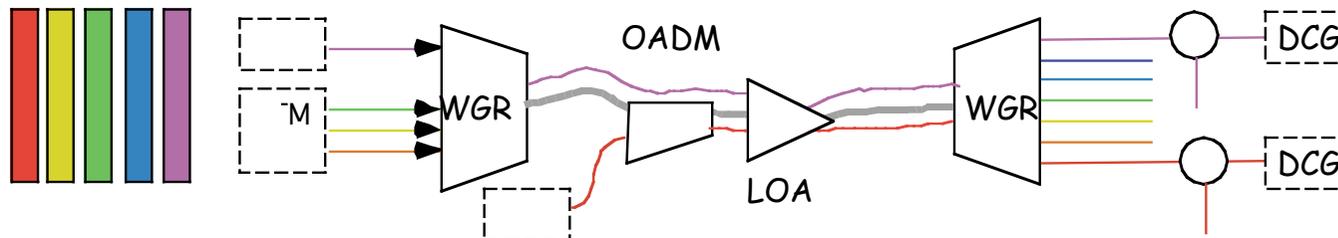


Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita.
Mario Martinelli/2010/Giugno



La rete di telecomunicazioni da “griglia” è diventata sempre più colorata ogni colore essendo una portante ottica che può scorrere liberamente nella rete ed essere trattata come un circuito indipendente



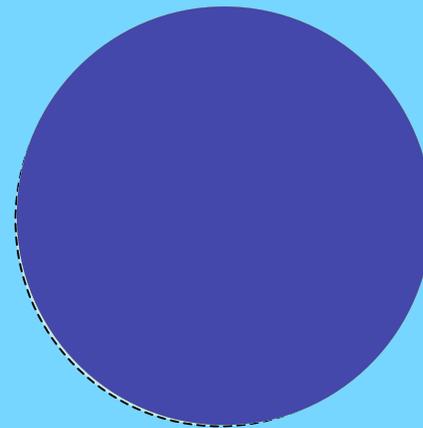


Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

Tutti questi segnali “multicolori” che propagano nella *stessa* fibra, nello *stesso* nucleo di 60 micron quadrati della stessa fibra, non si disturbano?

In altre parole, la luce è un buon mezzo per comunicare?





Per rispondere a questa domanda bisogna introdurre una nuova entità:
Il fotone.

La migliore definizione di fotone è dire che la luce è costituita da fotoni:
Tutta la luce, di qualsiasi origine (sole, lampadina, laser) e di qualsiasi
lunghezza d'onda, cioè di qualsiasi colore, è costituita da fotoni.

Quanti ?

Tanti.

La luce di questo "pointer" ha la potenza di circa 1 milliwatt ovvero 1 mW.
Questo significa che in un secondo fluisce un millijoule di energia luminosa.
Il fotone rappresenta la quantità elementare di energia luminosa o il "quanto".

La sua energia dipende dal suo colore: i fotoni usati nelle comunicazioni
ottiche hanno energia di 0,8 elettronvolt o 0,8 eV

(1 eV sono circa $1,6 \cdot 10^{-19}$ joule)

e quindi i fotoni hanno energia pari a $1,28 \cdot 10^{-19}$ joule.

I fotoni del colore rosso hanno una energia di circa $3,15 \cdot 10^{-19}$ joule

Quindi in un secondo questo pointer produce

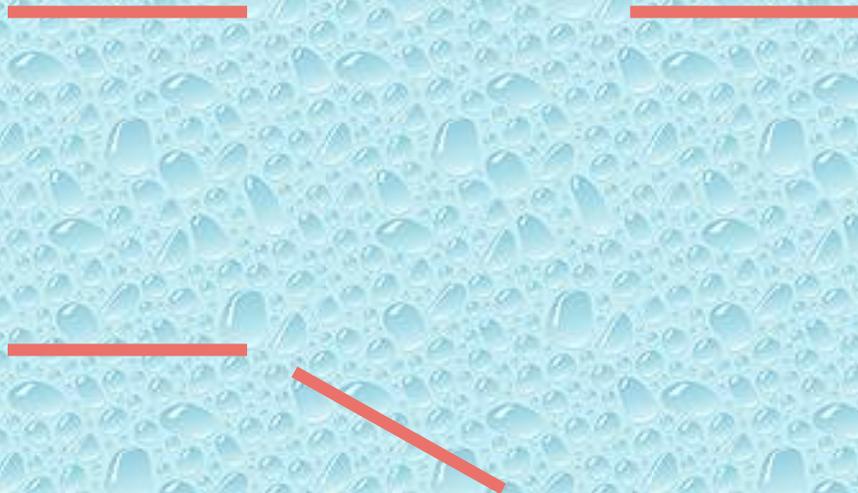
$10^{-3} / 3,15 \cdot 10^{-19} = 3,17 \cdot 10^{15}$ fotoni ovvero circa 3 milioni di miliardi di fotoni !



Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

I fotoni possono essere assorbiti dalla materia o emessi o diffusi



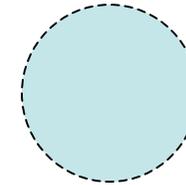
Questi processi rappresentano l'interazione dei fotoni con la materia e la forza di questa interazione si misura nella unità di misura della superficie: ad esempio in cm^2



Quando la luce colpisce un materiale assorbente, cioè un materiale che risulta alla vista “nero” l’area che vede il fotone è circa 10^{-16} cm^2



Quando la luce viaggia nella fibra ottica l’area che vede il fotone è circa 10^{-29} cm^2



Questo numero è 10^{13} volte più piccolo del precedente, cioè 10000 miliardi di volte più piccolo, è per questo che le fibre ottiche funzionano bene !

Se due segnali luminosi viaggiano nella stessa fibra ottica, il fotone di un segnale vede l’altro fotone con una area di circa 10^{-72} cm^2 : questo è un numero piccolissimo, praticamente zero !
Non c’è alcuna possibilità che un fotone incontri mai un altro fotone o come ebbe a dire PAM Dirac : un fotone interferisce solo con se stesso !



Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

I **fotoni** sono individui estremamente “*conformisti*” e assolutamente “*non-socievoli*” .
Esattamente il contrario degli **elettroni** che sono individui fortemente “*originali*” ed eccezionalmente “*socievoli*” .



Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

Per questo motivo la luce è il migliore mezzo per trasmettere informazione.



Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

...ma quanto costa...



Quanto “costa” trasmettere un bit di luce ?

L'energia costa circa 0,1 EURO/KWh, cioè 0,1 EURO/3,6 Mjoule

Se io produco fotoni laser con efficienza 0,5 (in realtà le sorgenti di oggi sono anche più efficienti), significa che produrre:

$0,5 \times 3,6 \cdot 10^6 / 1,28 \cdot 10^{-19} = 1,4 \cdot 10^{25}$ fotoni mi costa 0,1 EURO

Cioè, ai costi attuali dell'energia, con 1 EURO produco $1,4 \cdot 10^{26}$ fotoni



Cioè, ai costi attuali dell'energia, con 1 EURO produco $1,4 \cdot 10^{26}$ fotoni

Se anche trasmetto nelle peggiori condizioni di rumore, con questi numeri di fotoni posso trasmettere:

$$1,4 \cdot 10^{26} / 576 = 2,4 \cdot 10^{23} \text{ bit}$$

cioè praticamente un numero di Avogadro ($6 \cdot 10^{23}$) di bit accettando di commettere un errore ogni miliardo di bit trasmessi !



Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita.
Mario Martinelli/2010/Giugno

 N_A

di bit trasmessi in fibra
ottica con un tasso di
errore inferiore ad $1/10^9$

Un Numero di Avogadro di bit sono ..tanti :

ad esempio, se io trasmettessi 10 milioni di canali IP “flat” a 10 Mb/s per ogni canale, consumerei:

$10 \cdot 10^6 \times 10 \cdot 10^6 = 10^{14}$ bit/secondo e quindi con 1 EURO potrei trasmettere per

$N_A/10^{14} = 6 \cdot 10^9$ secondi, cioè siccome ci sono $3,1 \cdot 10^7$ secondi in un anno,

per circa 200 anni...



Le Comunicazioni Ottiche

abbiamo quindi visto che

le fibre ottiche sono il miglior mezzo trasmissivo esistente:
di esse utilizziamo solo qualche percento della loro capacità trasmissiva

la luce è il migliore mezzo per comunicare
ed anche in presenza di inevitabili errori,
comunicare bit con la luce è molto
conveniente...



Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

In un mondo dove tutte TUTTE le risorse scarseggiano,
Le comunicazioni ottiche sono una
RISORSA INFINITA



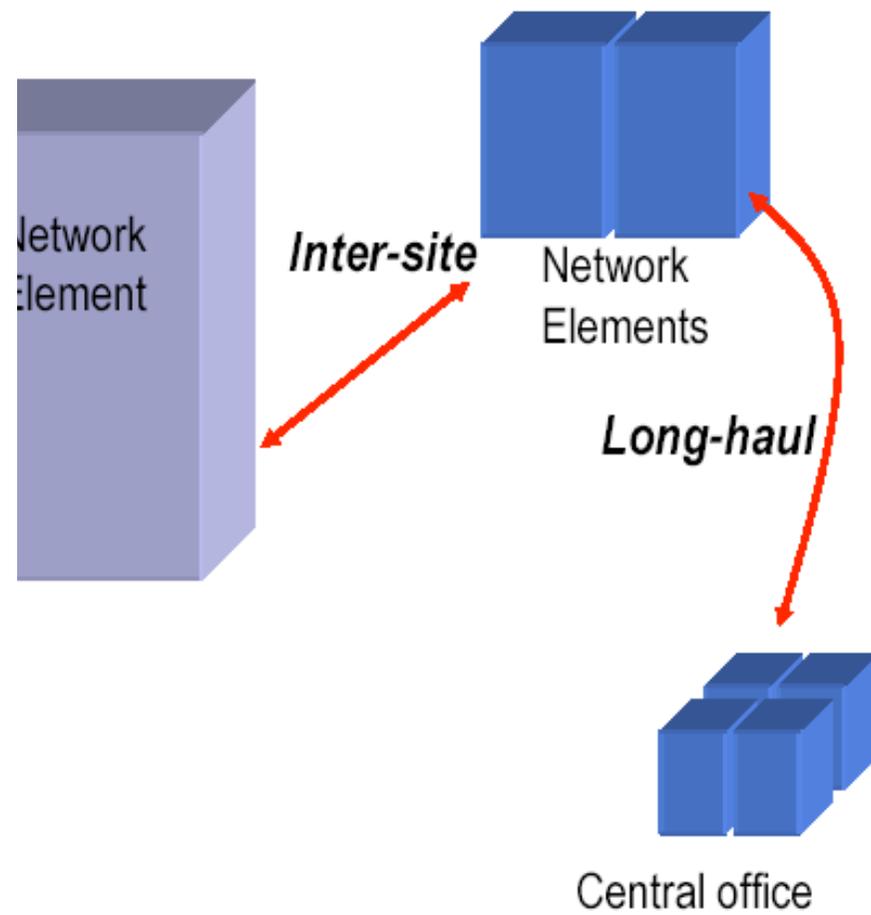
Le Comunicazioni Ottiche

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita
Mario Martinelli/2010/Giugno

Cosa c'è di nuovo ?

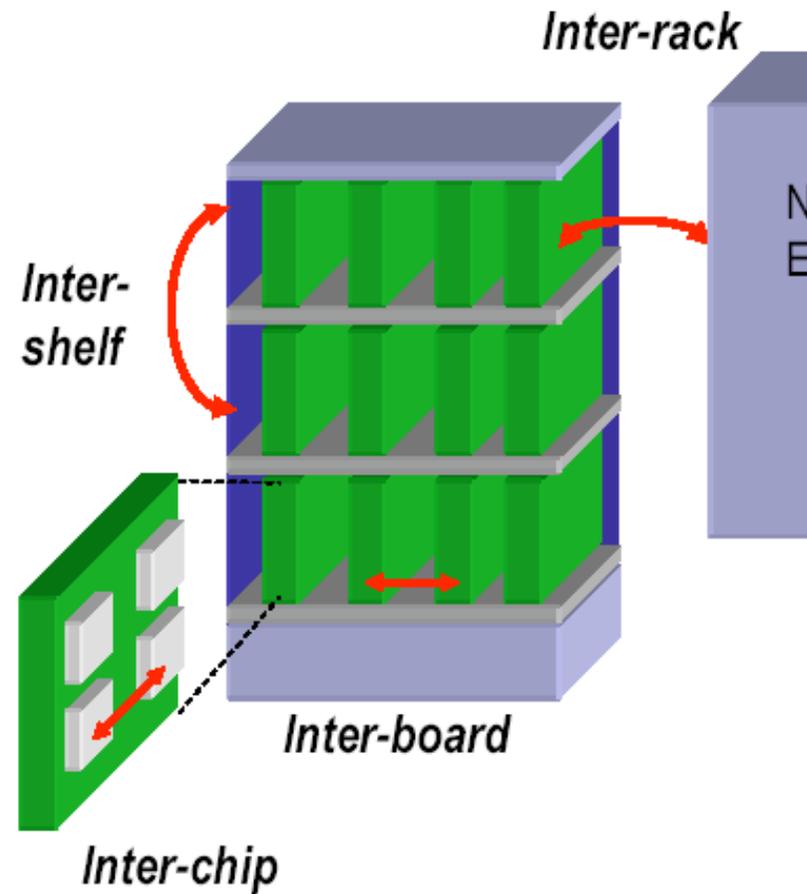


Classical DWDM Communications





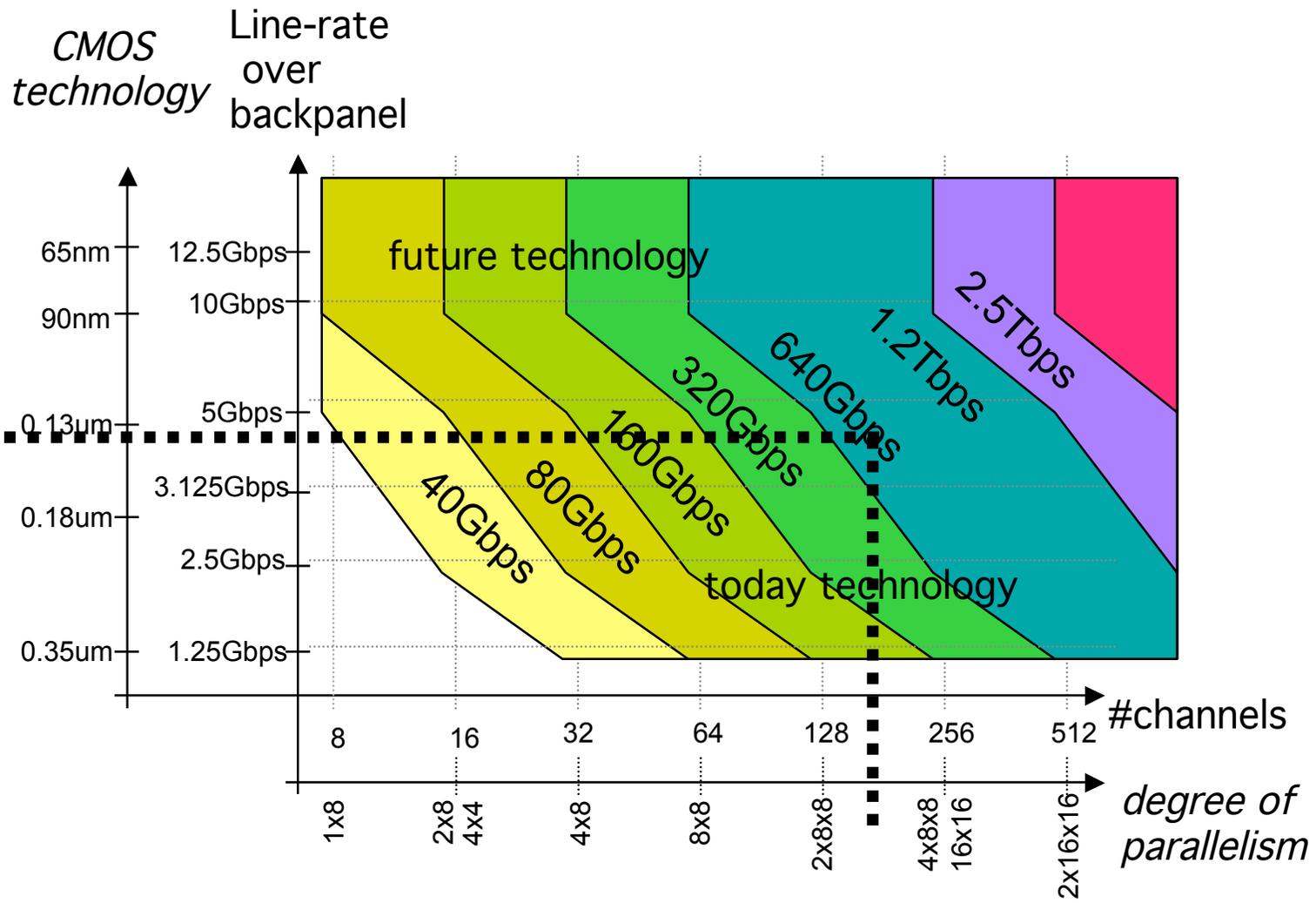
Optical Interconnections





Optical Computing

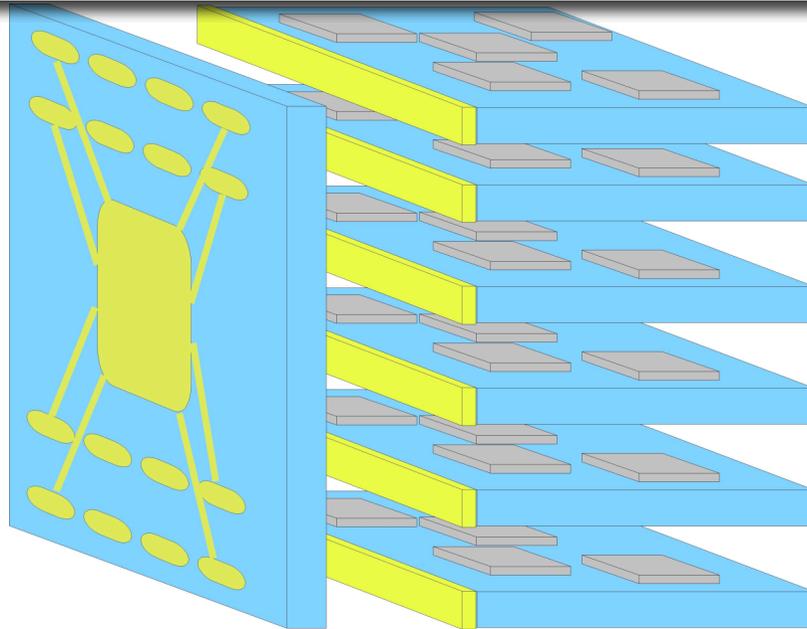
Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita.
Mario Martinelli/2010/Giugno



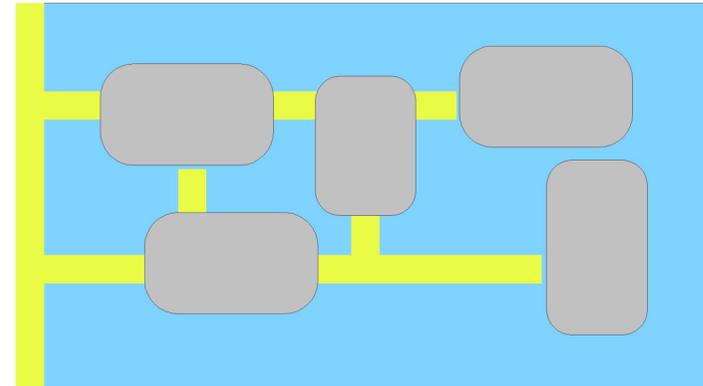


Optical computing

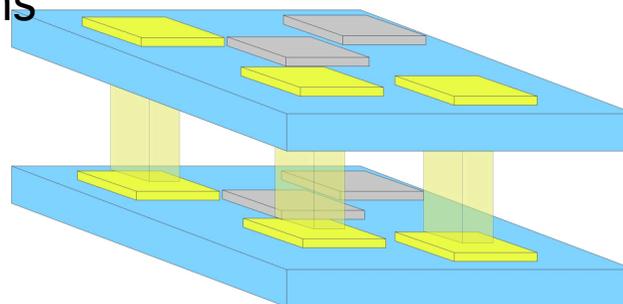
Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita.
Mario Martinelli/2010/Giugno



optical backplane
network for
communications
board-to-board



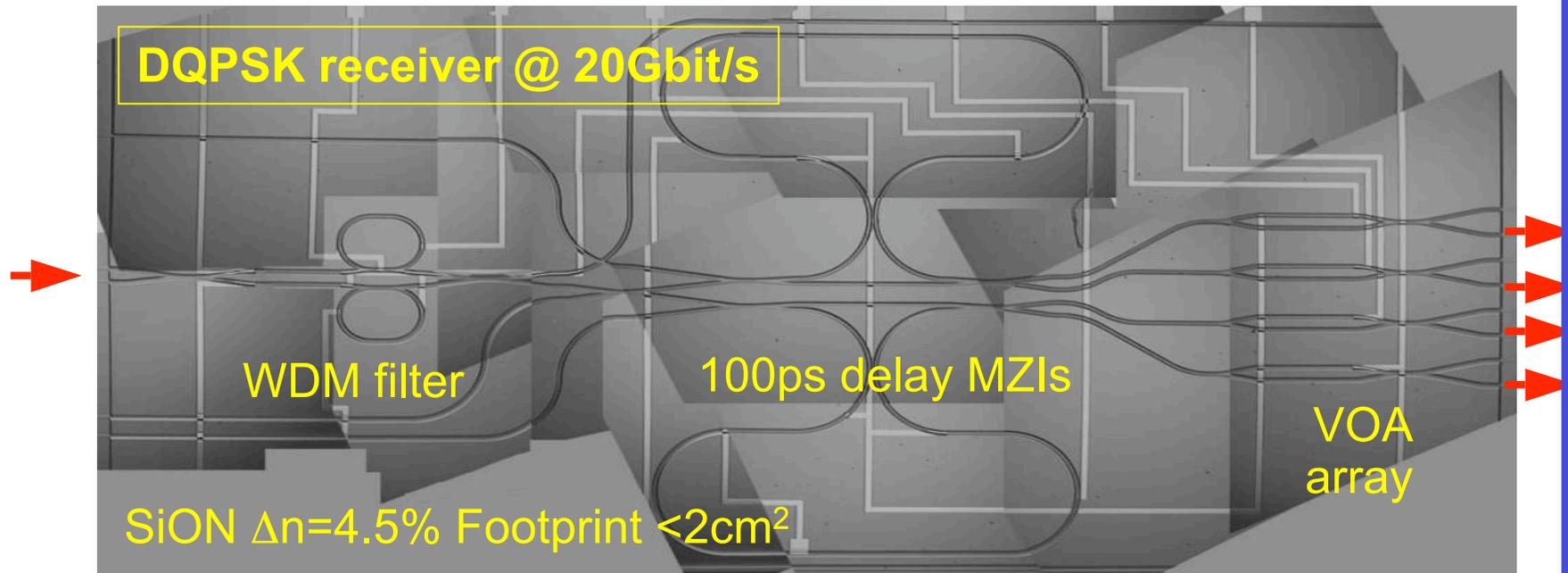
optical board for
communications
chip-to-chip



optical stage for
free-space inter-board
and inter-chip
communications

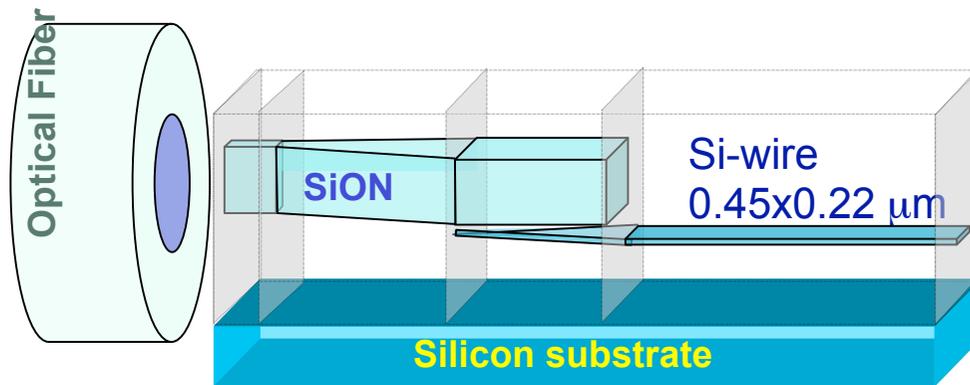


FROM SINGLE-DEVICE TO MULTIFUNCTION CIRCUIT: a whole DQPSK receiver with a WDM filter, a couple of 100 ps delay Mach-Zehnder interferometers and a VOA array realized in SiON technology on less than 2 sqcm chip.

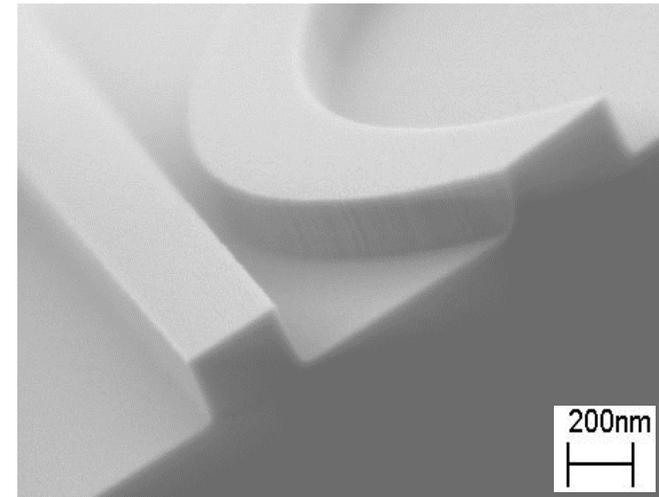




Silicon Photonics



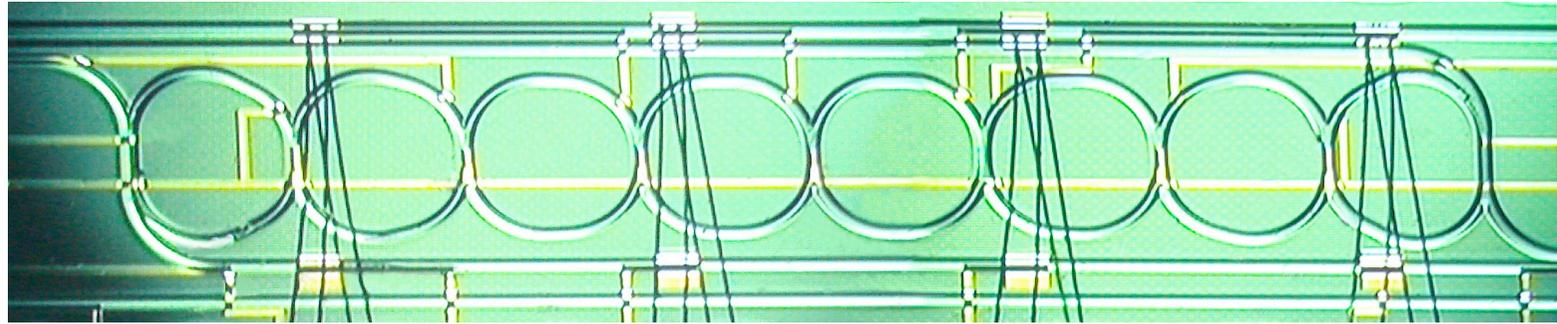
State of the art insertion loss: less than 1dB
ECIO 2007





Slow light

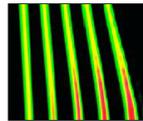
Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita.
Mario Martinelli/2010/Giugno



OPTICAL SLOW WAVE STRUCTURES

Andrea Melloni, Francesco Morichetti and Mario Martinelli

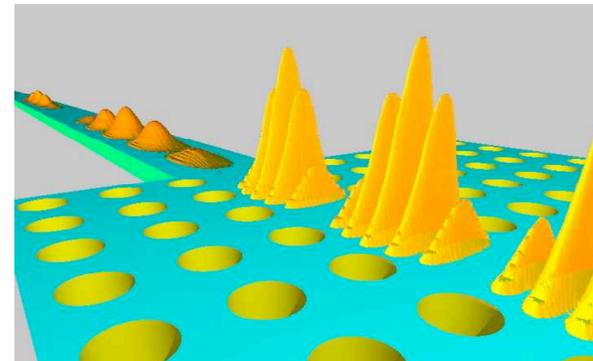
Nonlinear processes are enhanced in slow wave structures that consist of a cascade of directly coupled optical resonators. The more the group velocity of light is reduced, the higher the structure-induced enhancement of nonlinearities and wave interactions. Although slow wave propagation has not yet been displayed at optical frequencies, research being carried on today could one day enable slow wave structures to become the cornerstone of switches, routers, wavelength converters and other wideband devices for all-optical processing.



Light waves at different wave lengths can interact only by means of nonlinearities of the propagation medium. The development of devices for all-optical signal processing has traditionally been limited to materials with strong nonlinearities, but for most materials the nonlinear figure of merit $n_2 I_{eff}$ varies by a factor of 10 (see Ref. 1), with n_2 being the absorption coefficient, n_2 the response time of the material and I_{eff} the nonlinear interaction length. As a result, high speed and low absorption are inevitably accompanied by weak nonlinearity, which means that long devices or very high optical powers are typically required for nonlinear applications.

It is widely accepted that nonlinear interactions are enhanced inside optical resonators such as Fabry-Pérot cavities and microresonators. Examples of cavity-enhanced nonlinearities are described in the recent literature as are the theoretical and experimental results achieved in nonlinear phase modulation, switching and frequency mixing in a single resonator.^{2,3} For a single resonator, a high level of enhancement implies narrow bandwidths, unless the length of the cavity itself—which coincides with the nonlinear interaction length—is also reduced. This type of band gain trade-off prevents devices based on single resonators from operating efficiently in wavelength division multiplexed (WDM) channels modulated up to rates of several Gbit/s. As we will describe in this article, this impairment disappears when a series of directly coupled resonators are cascaded to produce an optical slow wave structure (OSW). In an optical OSW, additional resonators can be cascaded to increase nonlinear interaction lengths without affecting bandwidth. Spectral response can also be optimized to allow efficient optical signal processing on wideband channels.⁴

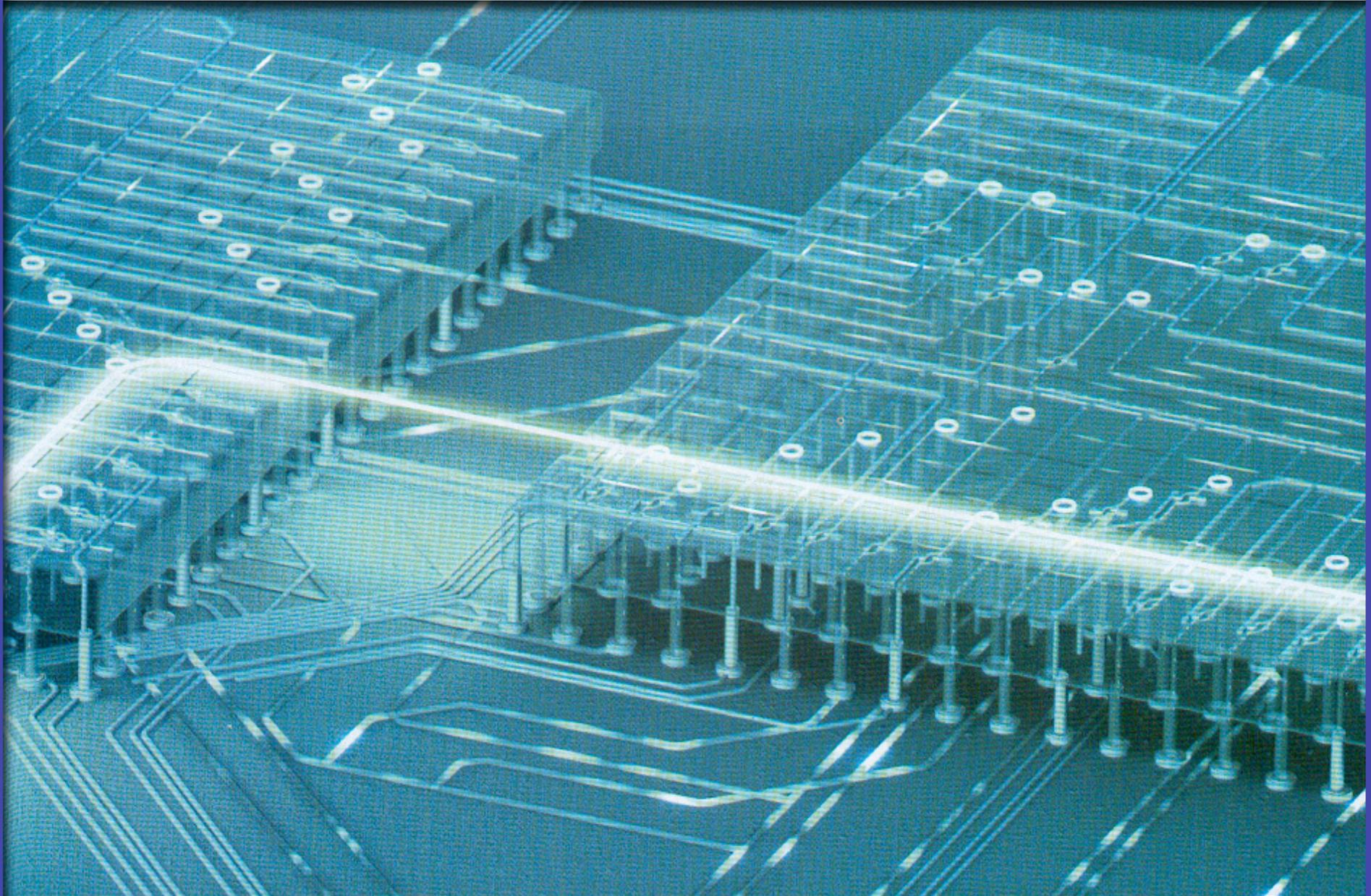
Left: Field intensity evolution of an optical pulse with a bandwidth larger than that of the OSW that contains it. Above: Propagation in a OSW of two pulses with increasing delay.





Optical computing

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita.
Mario Martinelli/2010/Giugno





Optical computing

Fotoni e Bit o la Risorsa Infinita.
Mario Martinelli/2010/Giugno

Oggi i fotoni sono utilizzati solo per il trasporto dell'informazione a grande e grandissima distanza
E' già visibile un domani in cui essi saranno utilizzati anche per il trasporto a distanze vicine e vicinissime mediante le tecnologie ottico-integrate, di silicon photonics e di slow-light.

Oggi esistono già esperimenti di quantum cryptography e quantum entanglement che sfruttano le proprietà quantistiche della luce:
è probabile che su questa strada troveranno la luce i computer del futuro