

# Optične komunikacije – stanje 2010

Trendi > 2010:

- Digitalni modulacijski formati
- DWDM multipleksiranje
- OFDM
- Koherentni sprejem
- PolMux in MIMO?

Mobitel d.d.,  
izobraževanje

11. 2. 2010,  
predavanje 1

Prof. dr. Jožko  
Budin

# Vsebina

## 1. Stanje v letu 2010

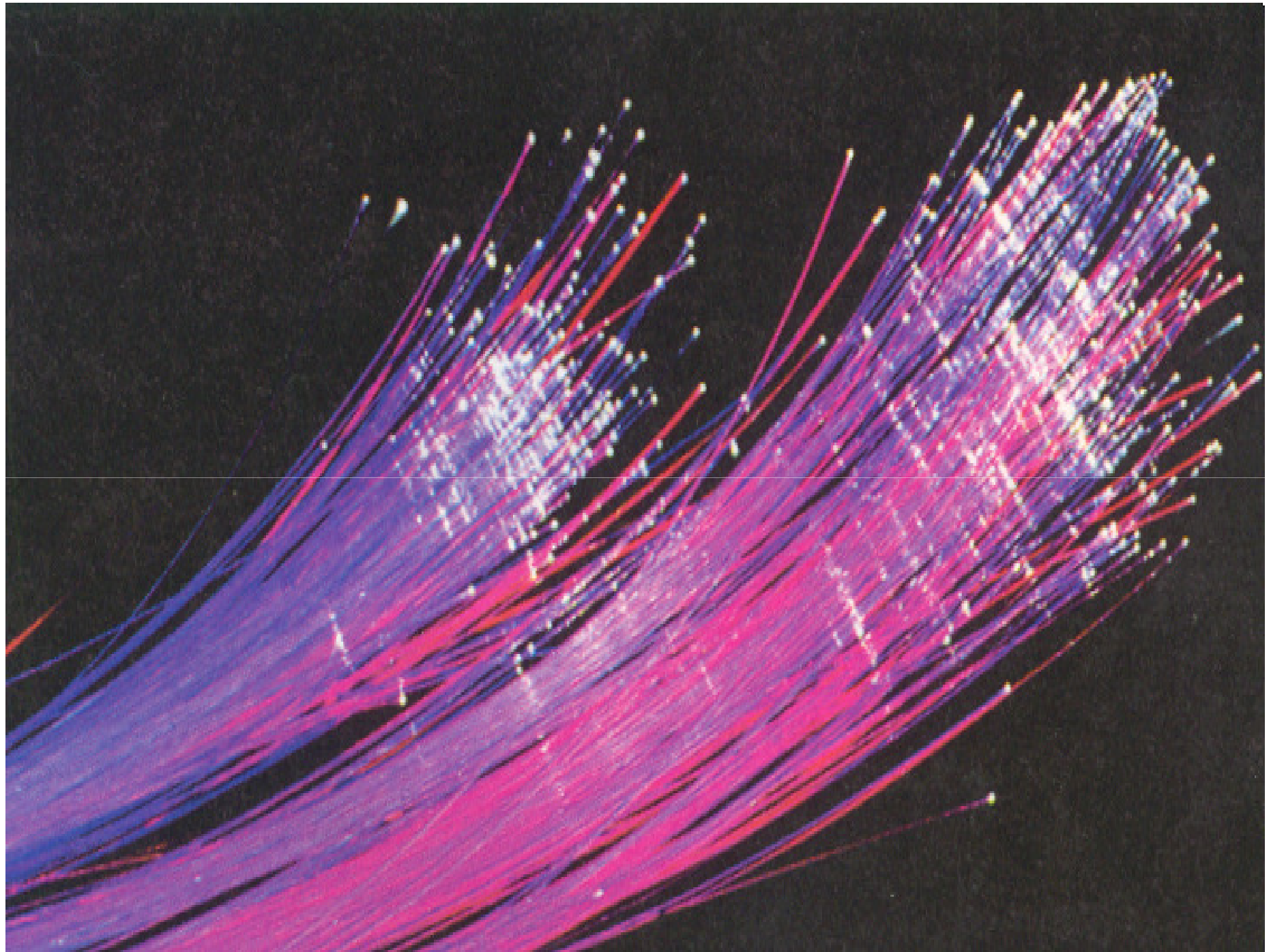
- Hrbtenična optična omrežja
- Dostopovna optična omrežja

## 2. Potrebe

- Terabitni prenos

## 3. Tehnologije

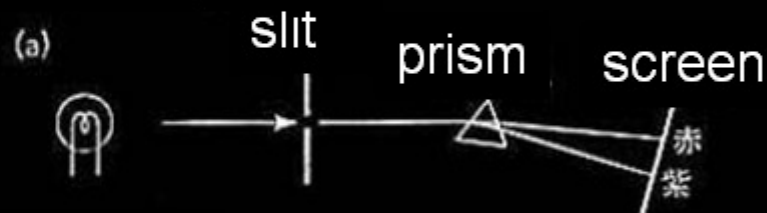
- Sedanje
- Napoved novih



# Spectrum

*Kirchhoff's law*

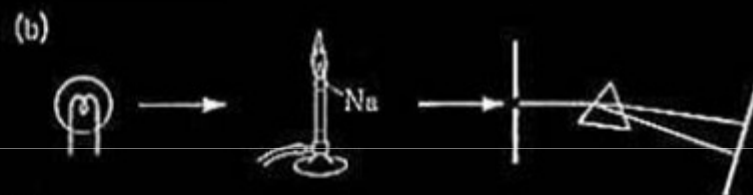
Continuous spectrum



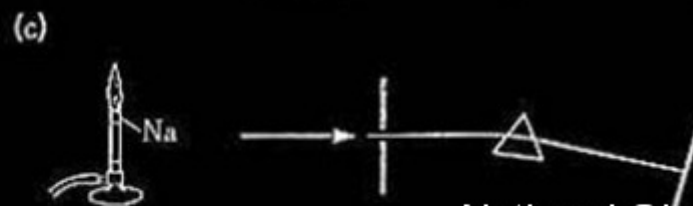
Continuous spectrum



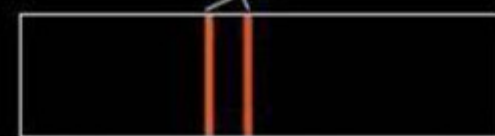
Line spectrum



Line absorption spectrum



Line emission spectrum



National Observatory

<http://centaurs.mtk.nao.ac.jp/~avell/study/SPECT>

*Yumi.A*

300nm

400nm

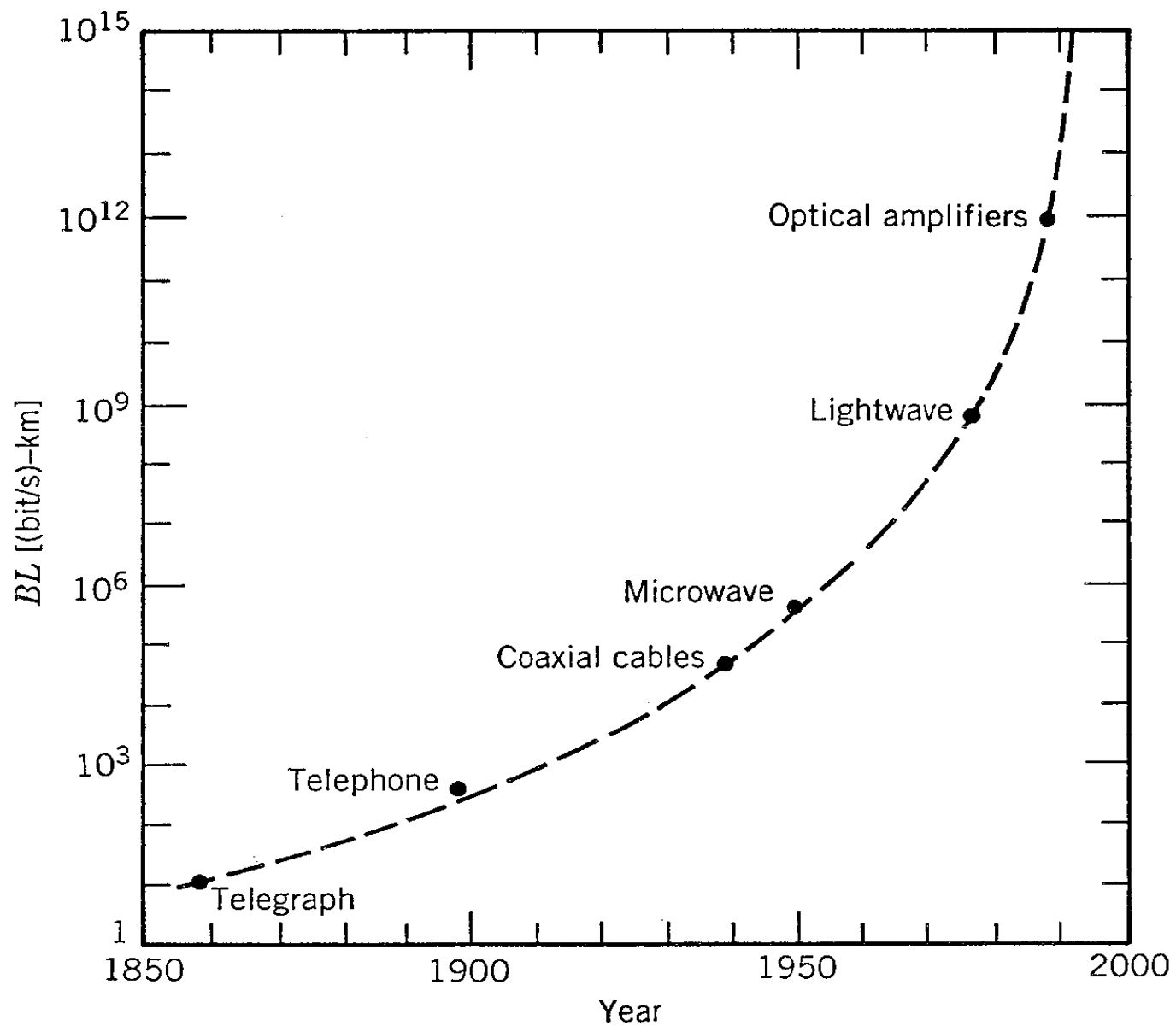
500nm

600nm

700nm



# Razvoji telekomunikacijii



# Morse



# A Short History of Optical Telecommunications

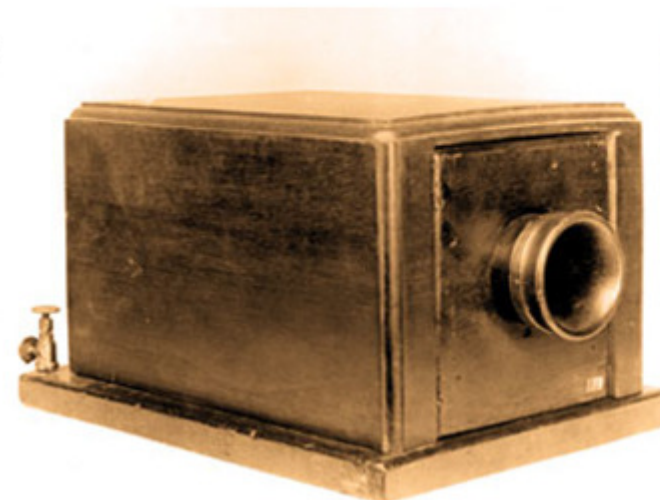
Circa 2500 B.C. Earliest known glass  
Roman times-glass drawn into fibers  
Venice Decorative Flowers made of glass fibers  
1609-Galileo uses optical telescope  
1626-Snell formulates law of refraction  
1668-Newton invents reflection telescope  
1840-Samuel Morse Invents Telegraph  
1841-Daniel Colladon-Light guiding demonstrated  
in water jet  
1870-Tyndall observes light guiding in a thin water jet  
1873-Maxwell electromagnetic waves  
1876-Elisha Gray and Alexander Bell Invent Telephone  
1877-First Telephone Exchange  
1880-Bell invents Photophone  
1888-Hertz Confirms EM waves and relation to light  
1880-1920 Glass rods used for illumination  
1897-Rayleigh analyzes waveguide  
1899-Marconi Radio Communication  
1902-Marconi invention of radio detector  
1910-1940 Vacuum Tubes invented and developed  
1930-Lamb experiments with silica fiber  
1931-Owens-Fiberglass  
1936-1940 Communication using a waveguide



1876-Alexander Graham Bell



1970 I. Hayashi  
Semiconductor Laser



# A Short History- Continued

1951-Heel, Hopkins, Kapany image transmission using fiber bundles

1957-First Endoscope used in patient

1958-Goubau et. al. Experiments with the lens guide

1958-59 Kapany creates optical fiber with cladding

1960-Ted Maiman demonstrates first laser in Ruby

1960-Javan et. al. invents HeNe laser

1962-4 Groups simultaneously make first semiconductor lasers

1961-66 Kao, Snitzer et al conceive of low loss single mode fiber communications and develop theory

1970-First room temp. CW semiconductor laser-Hayashi & Panish

April 1977-First fiber link with live telephone traffic-  
GTE Long Beach 6 Mb/s

May 1977-First Bell system 45 mb/s links  
GaAs lasers 850nm Multimode -2dB/km loss

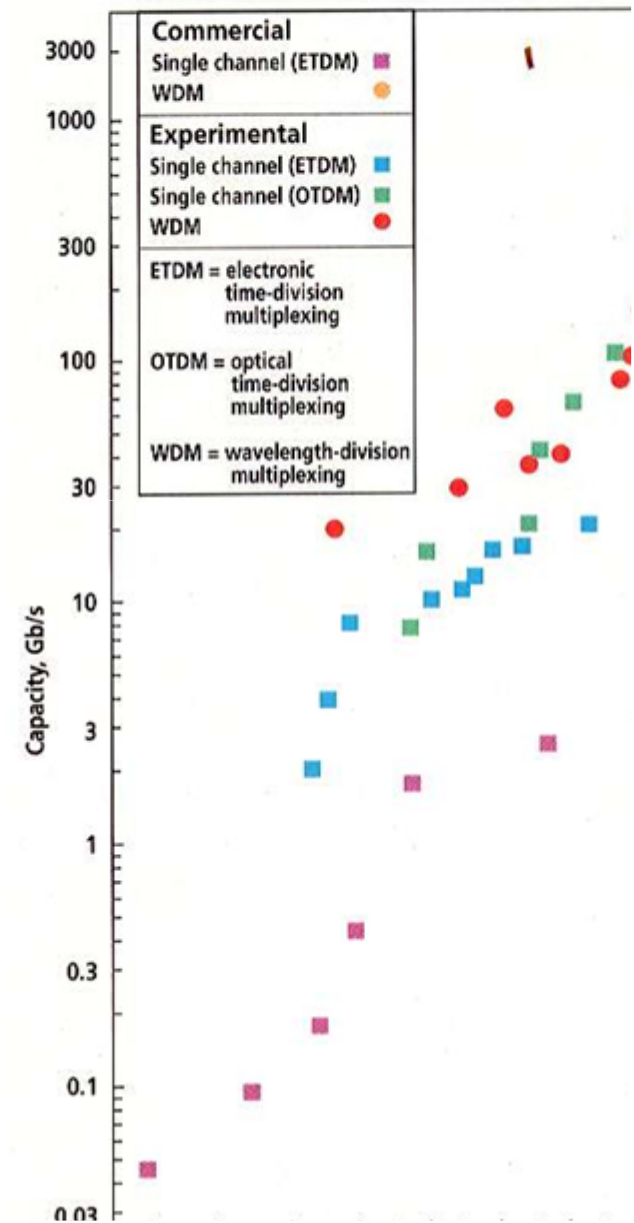
Early 1980s-InGaAsP 1.3  $\mu\text{m}$  Lasers  
- 0.5 dB/km, lower dispersion-Single mode

Late 1980s-Single mode transmission at 1.55  $\mu\text{m}$  -0.2 dB/km

1989-Erbium doped fiber amplifier

1 Q 1996-8 Channel WDM

4th Q 1996-16 Channel WDM





# Kaj nudijo optične komunikacije

- ➔ **Izjemno širok prenosni spekter in izjemno visoka prenosna zmogljivost**

Potencialni prenosni pas vlakna v področju nizkega slabljenja sega do 50 THz. Dosežena (l. 200 ) največja prenosna zmogljivost vlakna je 0 Tb/s (1 Tb/s je ekvivalent za 15 milijonov telefonskih pogovorov po 64 kb/s).

- ➔ **Nizko slabljenje in znatna prenosna razdalja**

Z vlaknom slabljenja 0,2 dB/km je mogoče premostiti razdaljo 100 km pri oslabitvi signala za 20 dB. Z optičnim ojačenjem in regeneracijo je mogoče doseči čezoceanske razdalje.

- ➔ **Odpornost na motnje in visoka zanesljivost prenosa**

Optično vlakno je vase zaprt prenosni vod, ki se ne sklaplja z zunanjimi polji ali motnjami. BER v optičnih komunikacijah je običajno  $10^{-9}$  in je lahko  $10^{-12}$  do  $10^{-15}$ .

# Charles K.Kao, Nobelova nagrada, 2009



Charles Kuen Kao

- roj. 1933, Shanghai
- diploma v UK in doktorat na UCL, UK (H. Barlow)
- služba Standard Telephone Laboratories
- rektor Kitajske Univerze v Hong Kongu
- delo v Hong Kongu in ZDA

Nagrade in častni naslovi:

- IEEE Life Fellow
- IEE Faraday Medal
- Fellow of the Royal Society
- brezštevni častni doktorati, priznanja in članstva ter visoke službe

- Nobelova nagrada (1/2) za fiziko, 2009  
“Groundbreaking achievements concerning the transmission of light in fibers for Optical Communication”

# Optične komunikacije, kronologija

Članek, ki je pred štirimi desetletji v temelju spremenil razvoj telekomunikacij:

Kao, K. C., Hockham, G. A., 1966:

“Dielectric – fibre surface waveguides for optical frequencies”, Proc. IEE **113** (7), str. 1151 – 1158

Kao je pravilno ugotovil, da bi pri slabljenju enorodovnega vlakna pod 20 dB/km že bilo mogoče uporabljati svetlobo za komunikacije.

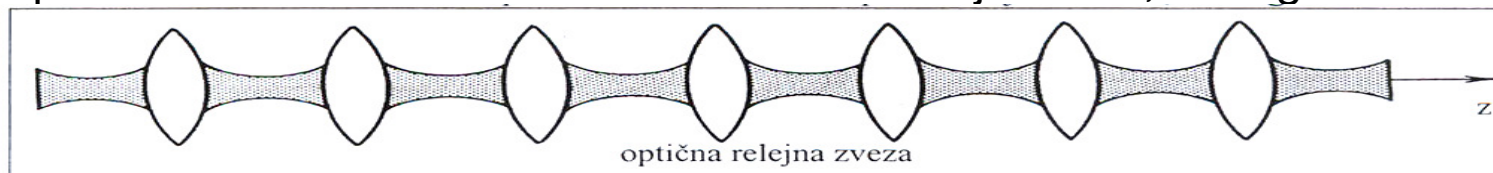
Ugotovil je, da so nečistoče v SiO<sub>2</sub> vlaknu vzrok za tedanjo visoko vrednost slabljenja (>>100dB/km) in napovedal, da bo z odstranitvijo nečistoč in drugih strukturnih pomanjkljivosti mogoče doseči znatno nižje slabljenje oz. zmerne, toda že uporabne prenosne razdalje.

Kao je s tem kot prvi načrtoval razvoj v naslednjih desetletjih. Zato si zasluži ime pionir na področju optičnih komunikacij ali vzdevek “oče optičnih komunikacij”.

# Optične komunikacije, kronologija 1/2

Jeff Hecht

- <1960- slabljenje do 1000 dB/km
- 1960- prvi laser, Theodor Maiman, Hughes Research Labs
- 1960- optični zračni vod v cevi z lečami za fokusiranje žarka, George Goubau



- 1961- teorija enorodovnega vlakna, Elias Snitzer
- 1962- tankoplastni valovod, valovodi za mm valove, A. Karbowiak, STL
- 1964- C.K.Kao, proučitev uporabe **enorodovnega** vlakna, Standard Telecommunication Laboratories Ltd. (STL), British Post Office, Harlow, UK
- **1966- Kao in Hockham objavita svoj slovit članek** (zanimivost: skoraj istočasno Alain Werts, CSF, L'Onde Electronique, Francija, objavi podobno vsebino)
- 1966- Kao predlaga sodelovanje Bell Labsu, ostane brez odziva
- 1967- Corning Glass Works zasluti priložnost, Robert Maurer osnuje projekt za vlakno iz taljenega kremena (SiO<sub>2</sub>)
- 1967- S. Kawakami (Japonska) predlaga **mnogorodovno gradientno** optično vlakno
- **1968- R. Maurer, D. Keck, F. Kapron in P. Schultz izdelajo enorodovno vlakno (SMF) s primesjo titana s slabljenjem 17 dB/km pri 633 nm**
- **1969- Bell Labs in hkrati Fizikalno-tehniški Inštitut loffe v Leningradu razvijeta polprevodniški laser, delujoč na sobni temperaturi.**
- 1971- Ugotovitev: na valovni dolžini 1,3  $\mu\text{m}$  vlakno brez razpršitve impulza.
- 1972- Bell Labs in Southampton nista mogla doseči Corningovih rezultatov, zato

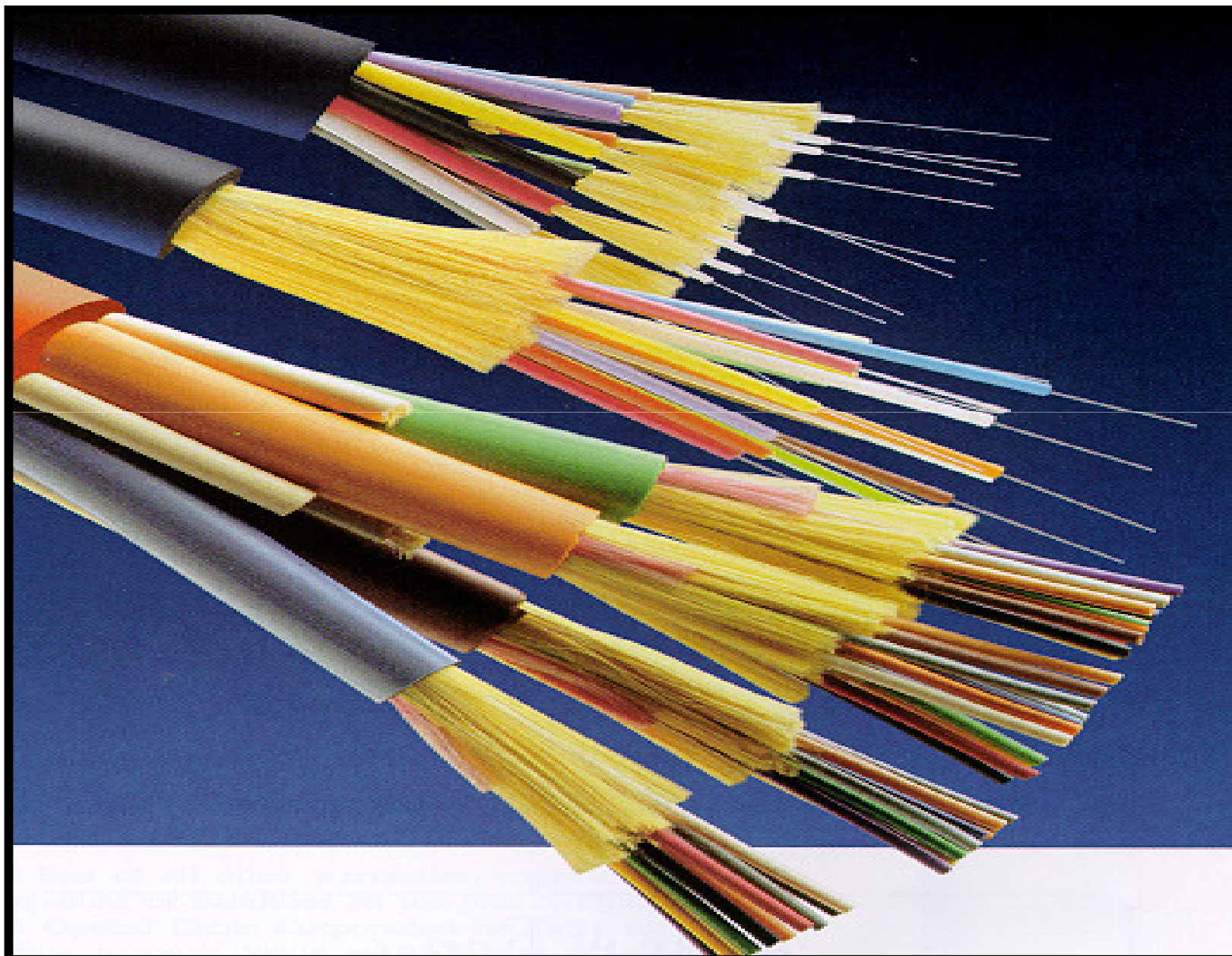


# Optične komunikacije, kronologija 2/2

razvijata vlakno s tekočinskim jedrom !!!

- 1972- Iz izkušnje, da ima enorodovno vlakno malo prednosti in več pomanjkljivosti, se Corning preusmeri na mnogorodovna gradientna vlakna, doseže 4dB/km.
- **1973- Razvoj tehnologije MCVD, J. MacChesney, AT&T, Bell Labs**
- 1973- Zanimanje za mikrovalovne medmestne povezave na milimetrskih valovih in tekma z optiko
- 1975- Bell Labs in British Post Office razvijata valovode na mikrovalovih, potem pa program opustita
- 1976- NTT Ibaraki Lab in Fujikura izdelata vlakno s slabljenjem 0,47 dB pri 1,2  $\mu\text{m}$
- 1978- Obnovitev interesa za enorodovno vlakno
- **1978- Osamosvojitev področja. Prva optična konferenca, Boston**
- 1978- AT&T, STL načrtujejo prvi optični transatlantski kabel in s tem končujejo ero podmorskega koaksialnega kabla
- **1978- NTT Ibaraki Lab doseže slabljenje enorodovnega vlakna 0,2 dB/km pri 1,55  $\mu\text{m}$**
- 1980- Polaganje prvega čezatlantskega optičnega kabla TAT-8, enorodovna vlakna na 1,3 $\mu\text{m}$ . Dograditev in začetna uporaba v letu 1988
- 1981- Prvi poskusi polaganja vlakna do doma (Biarritz, Francija, Elie, Kanada)
- 1982- BT se odloči za polaganje enorodovnega vlakna
- **1987- Dave Payne, University of Southampton, razvije Erbijeve optični vlakenski ojačevalnik na 1,55 $\mu\text{m}$**
- 1993- Linn Mollenauer, Bell Labs, in M. Nakazawa, NTT; solitoni za doseganje skoraj neomejene razdalje. Uvajanje vrste novih uspešnih tehnologij (FEC, WDM itd.)

# Optični vlakna in kabli

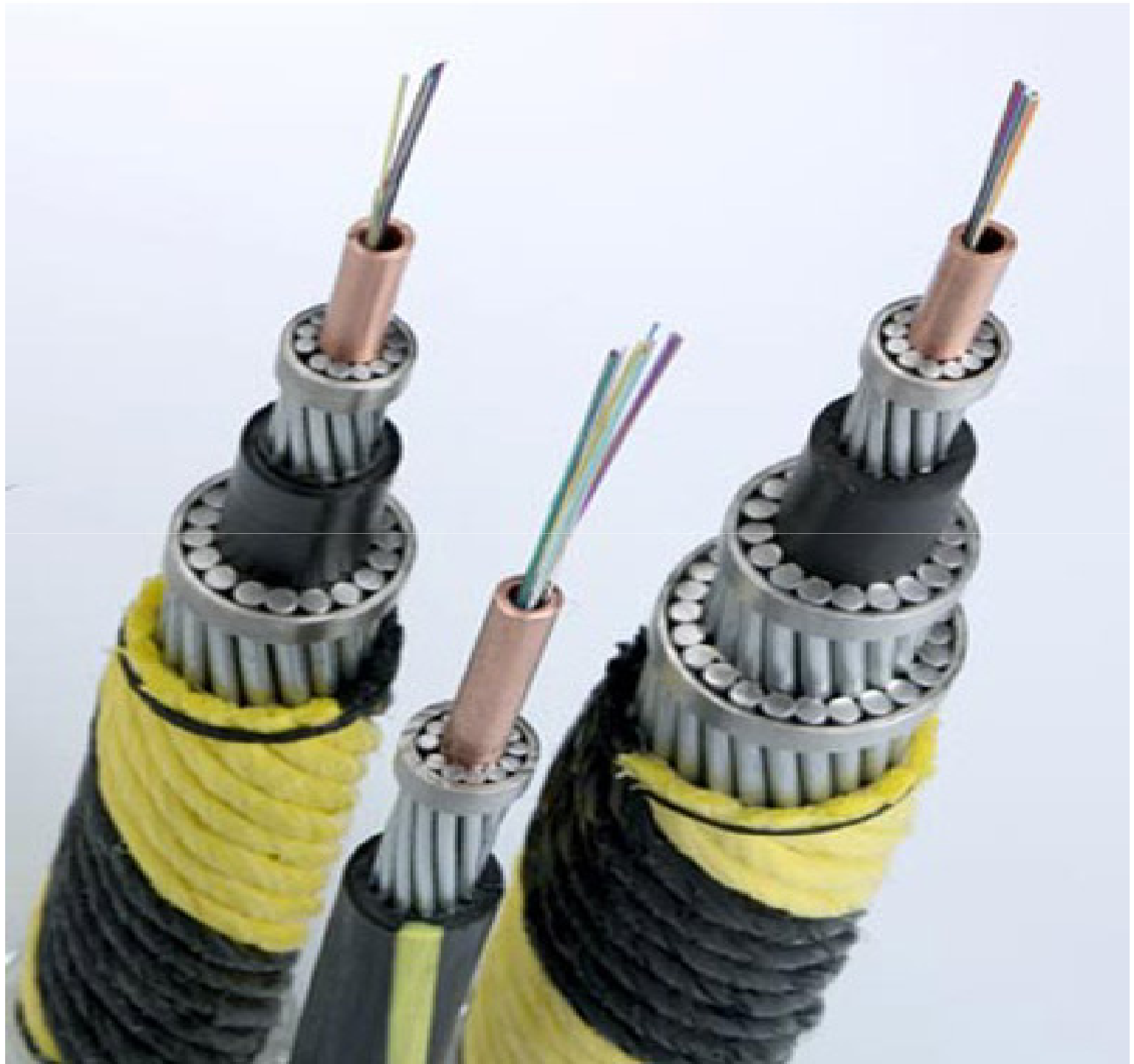


# Primer optičnega kabla



# Pod- morski optični kabli

Corningov  
podmorski  
optični kabel  
(do 144 vlaken)



# Kabli, žični in optični

**Žični par – 6  
telefonskih pogovorov**

**Doseg brez ojačevanja  
do nekaj km**

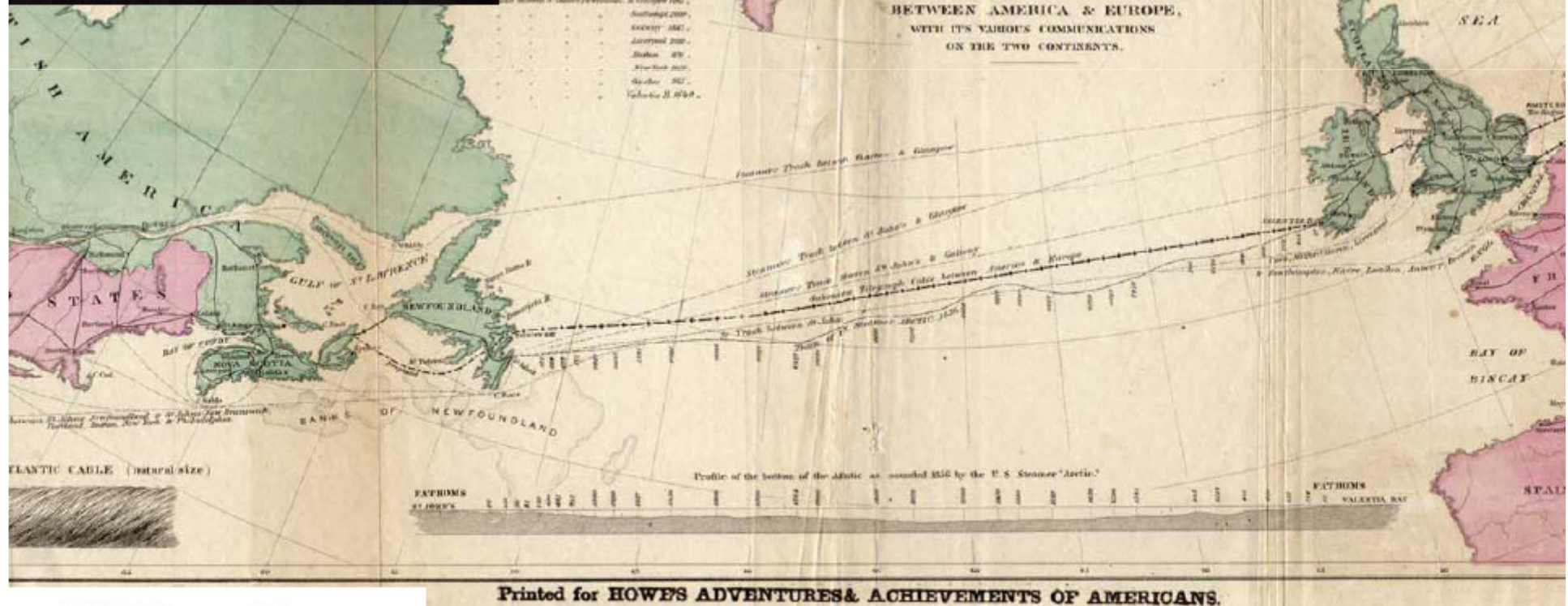
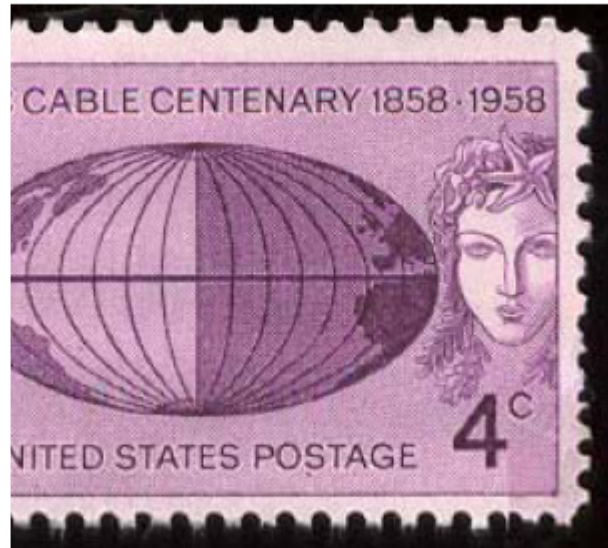
**Vlakenski par – več sto  
milijonov pogovorov**  
**Doseg brez ojačevanja do 100 km**





# August 16, 1858 Message from Queen Victoria to president James Buchanan

Cyrus Field, Lord Kelvin, Samuel Mor



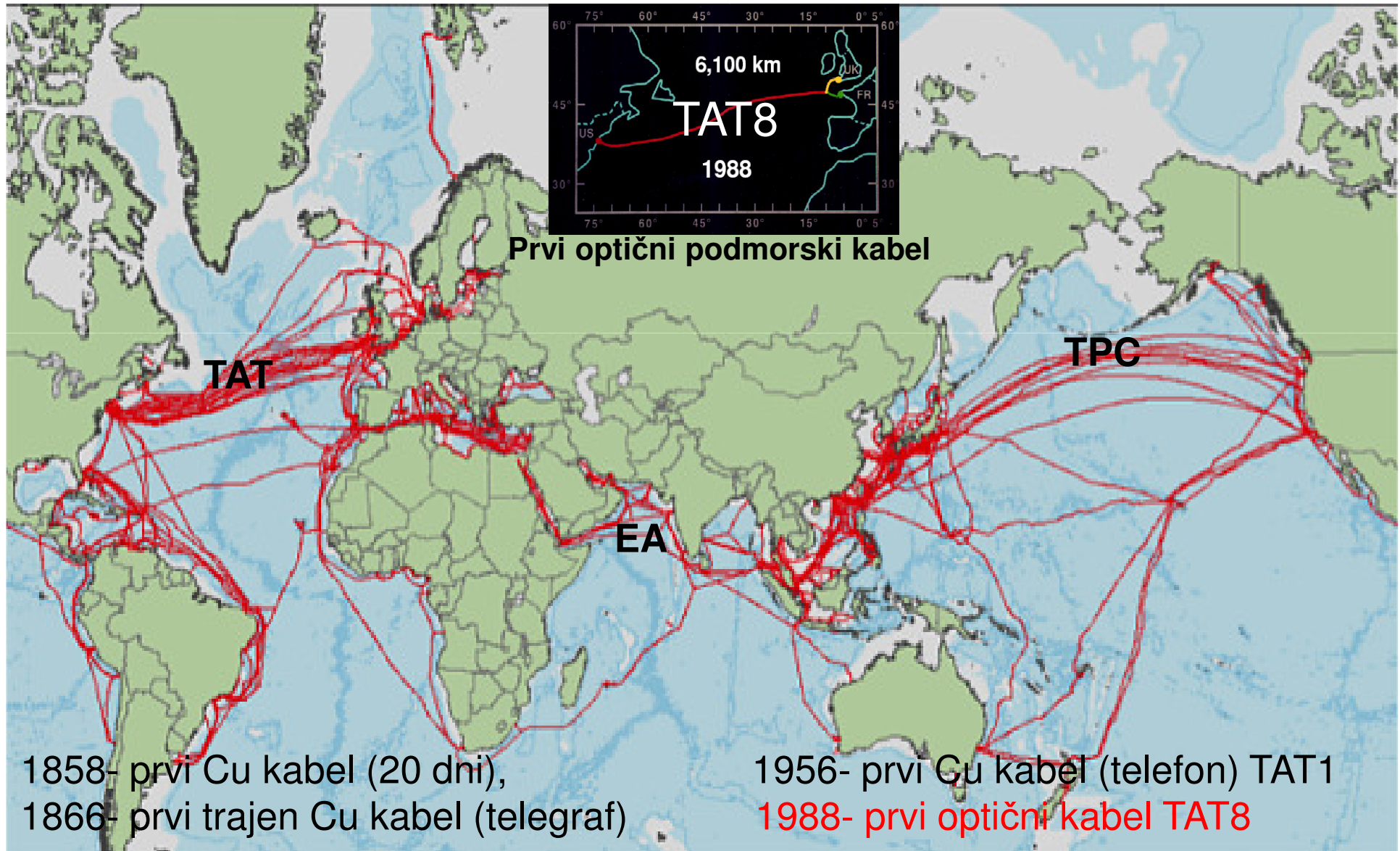


# Nekdanje telefonsko bakreno kabelsko omrežje na Atlantiku 1858 - 1988



# Globalna podmorska optična hrbtenica

## Trans-Atlantsko, Evro-Azijsko, Trans-Pacifiško

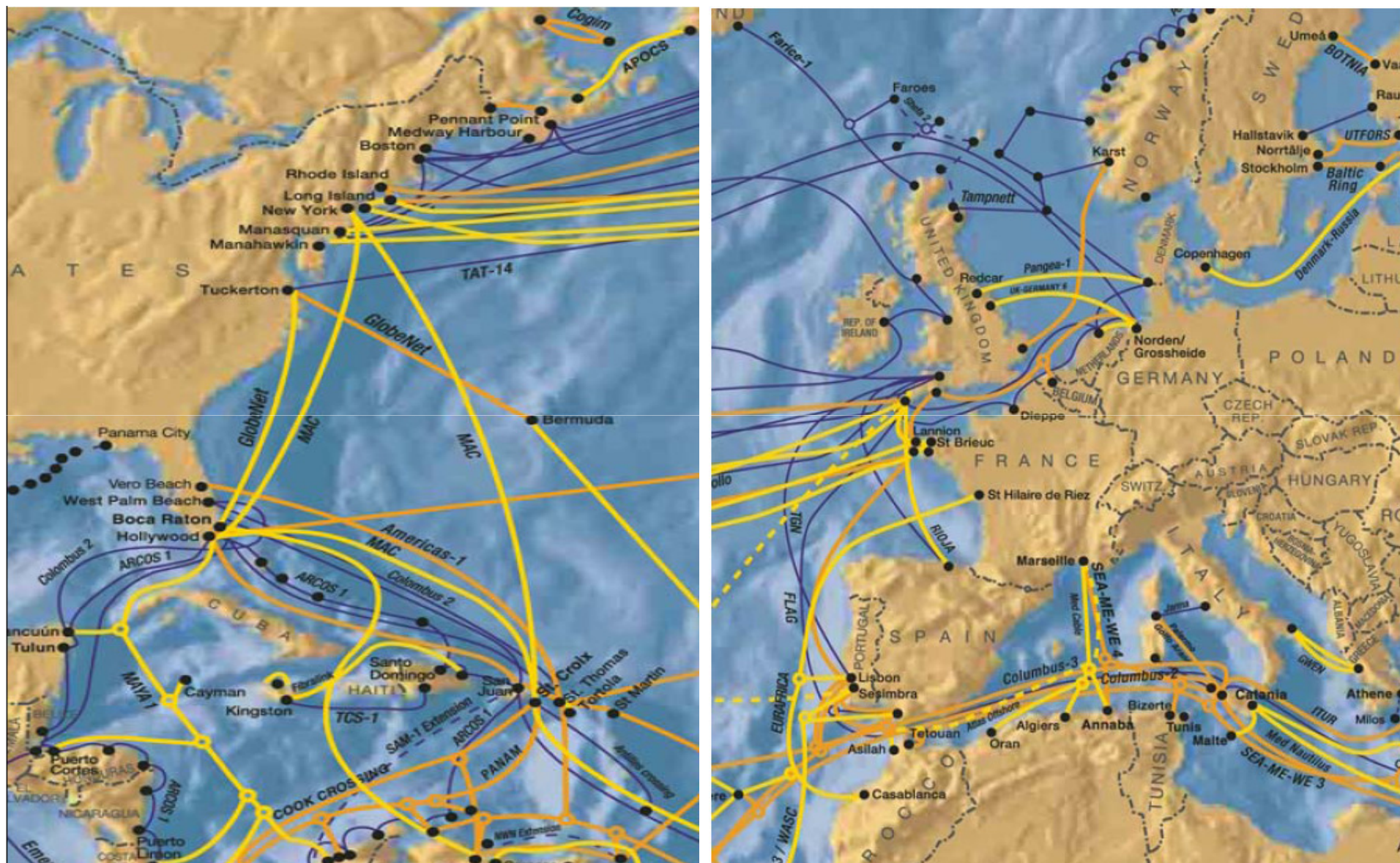






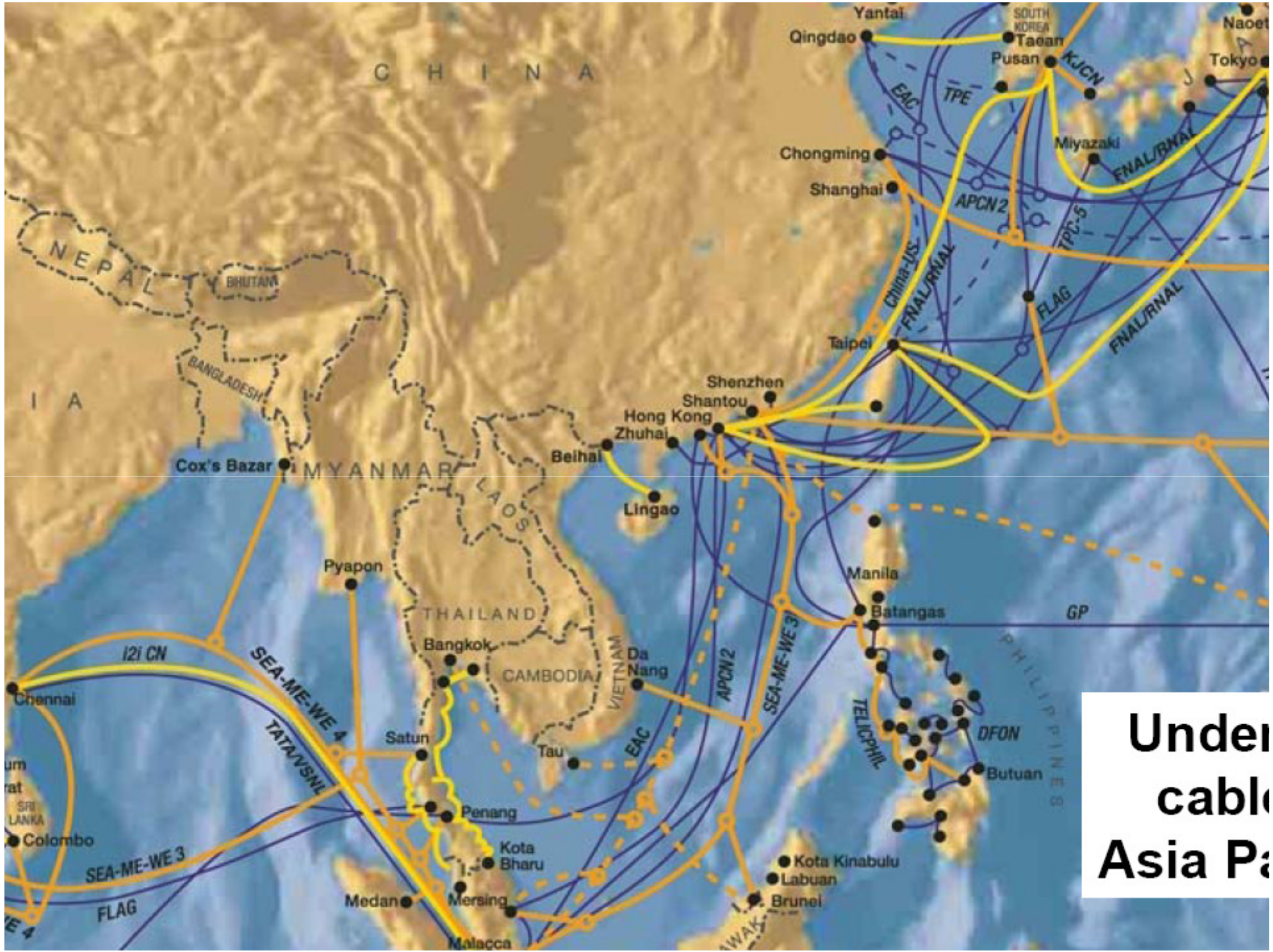


# Kabli na Atlantiku in v Sredozemlju



19.12.2008, okvara kablov SEA-ME-WE3, SEA-ME-WE4, FLAG

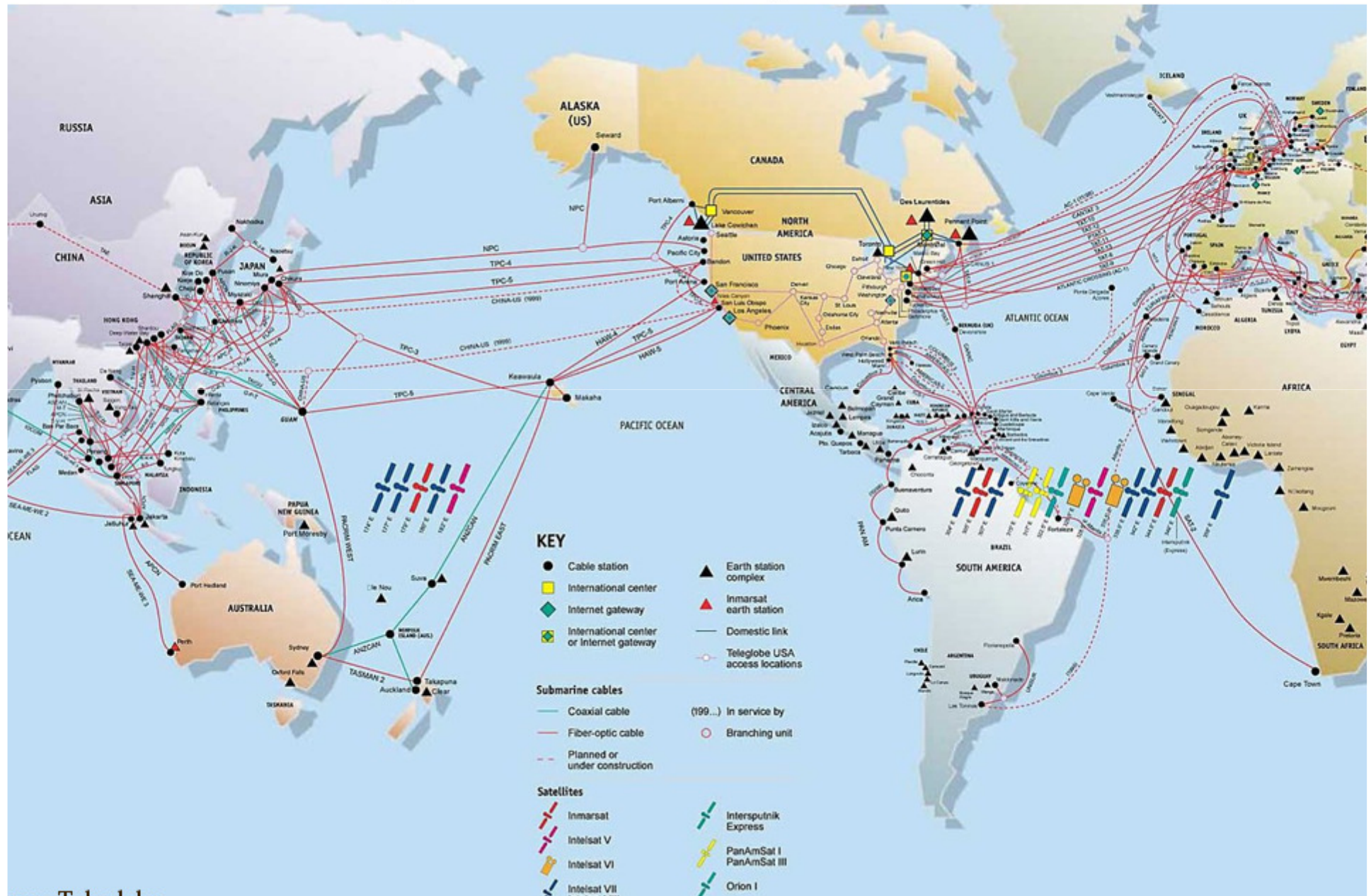




**Under  
cable  
Asia Pa**

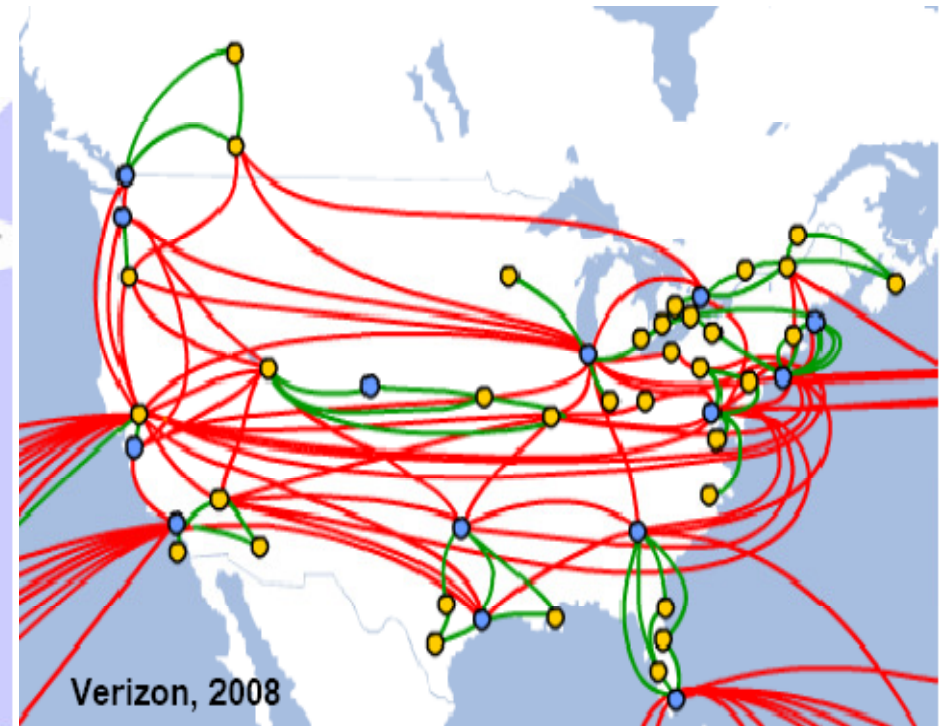
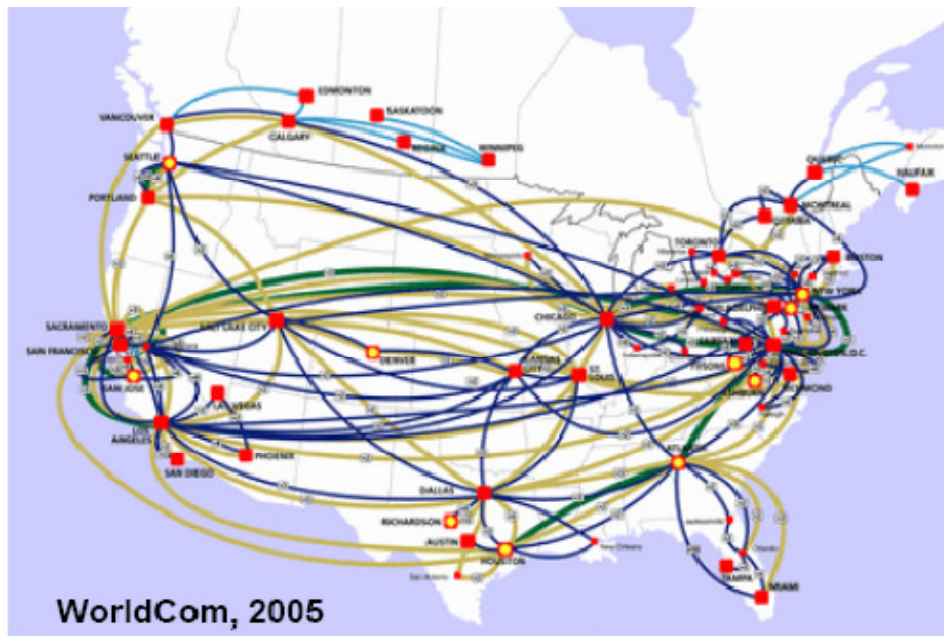


# How widespread are optical networks?





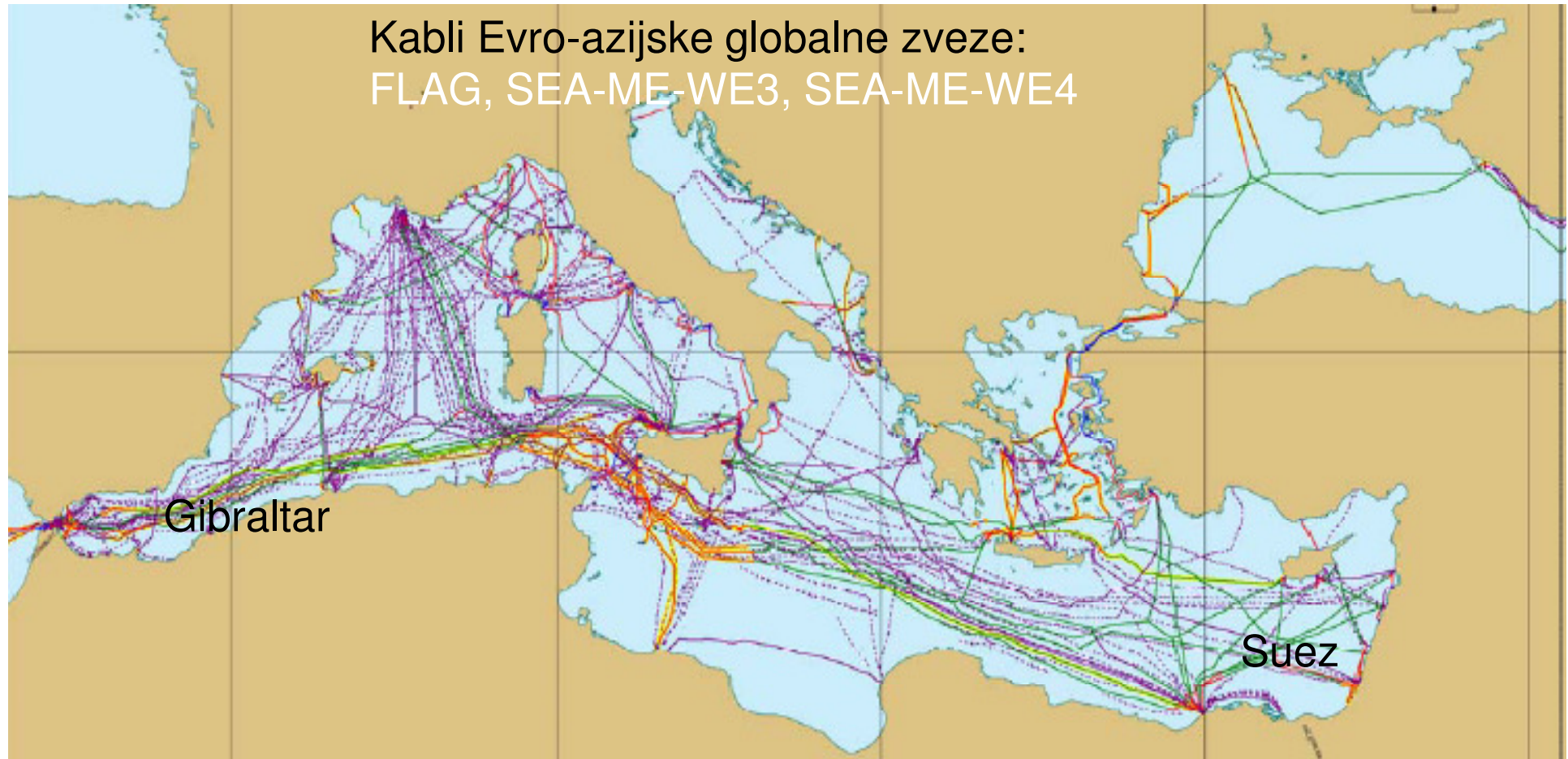
# ZDA: Omrežje AT&T in Verizon



AT&T in Verizon upravljata skupaj 2/3 vsega prometa po omrežju



# Kabli v Sredozemskem morju



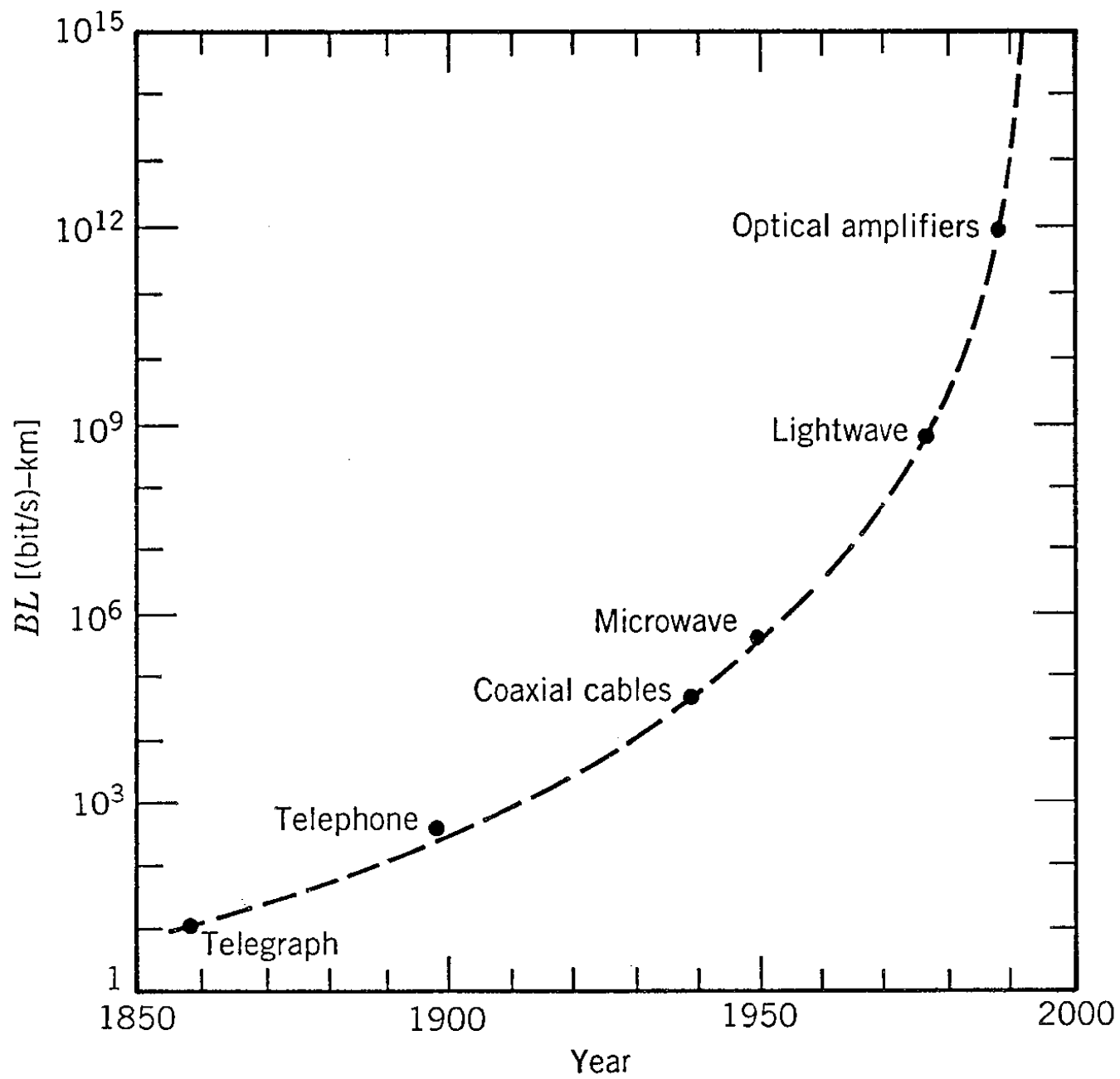
Skupna dolžina vseh položenih kablov (ocenitev) 500.000 km,  
operativnih kablov 1/8.

France Telecom, 2007

# Evro-Azijska transkontinentalna magistrala (načrt)







# Podmorska zveza Zahodna Evropa – Srednji vzhod – Daljni vzhod

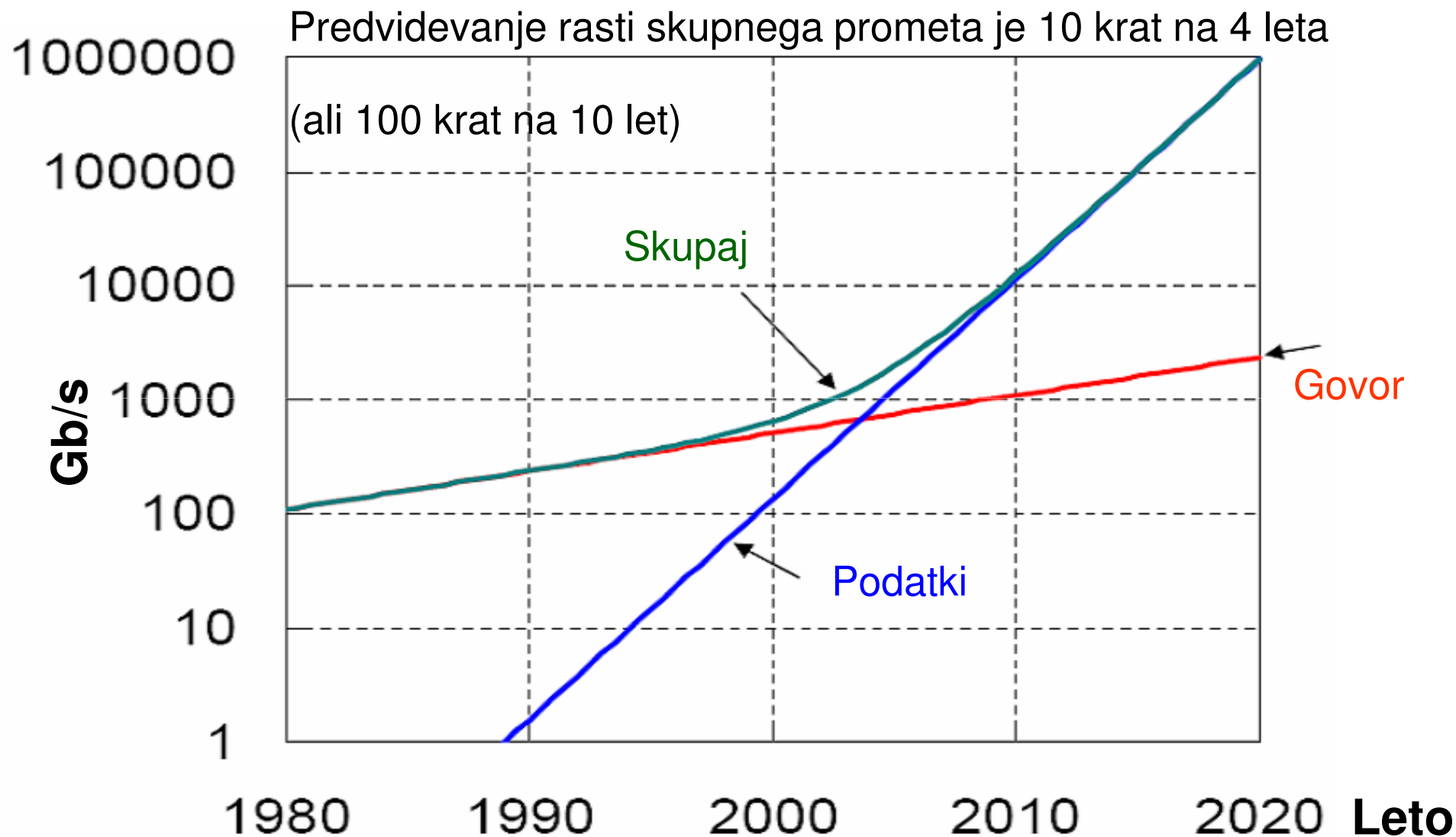
## Primer kabla SEA-ME-WE3

- Skupna dolžina omrežja 39.000 km
- Bitna hitrost kanala WDM 10 Gb/s
- Število N kanalov WDM  
na vlakenski par 8
- Število vlakenski parov 2
- Skupna kapaciteta  $10 \times 8 \times 2 = 160$  Gb/s
- Št. telefonskih pogovorov  $160.000.000 / 64 =$   
 $= 2.500.000$

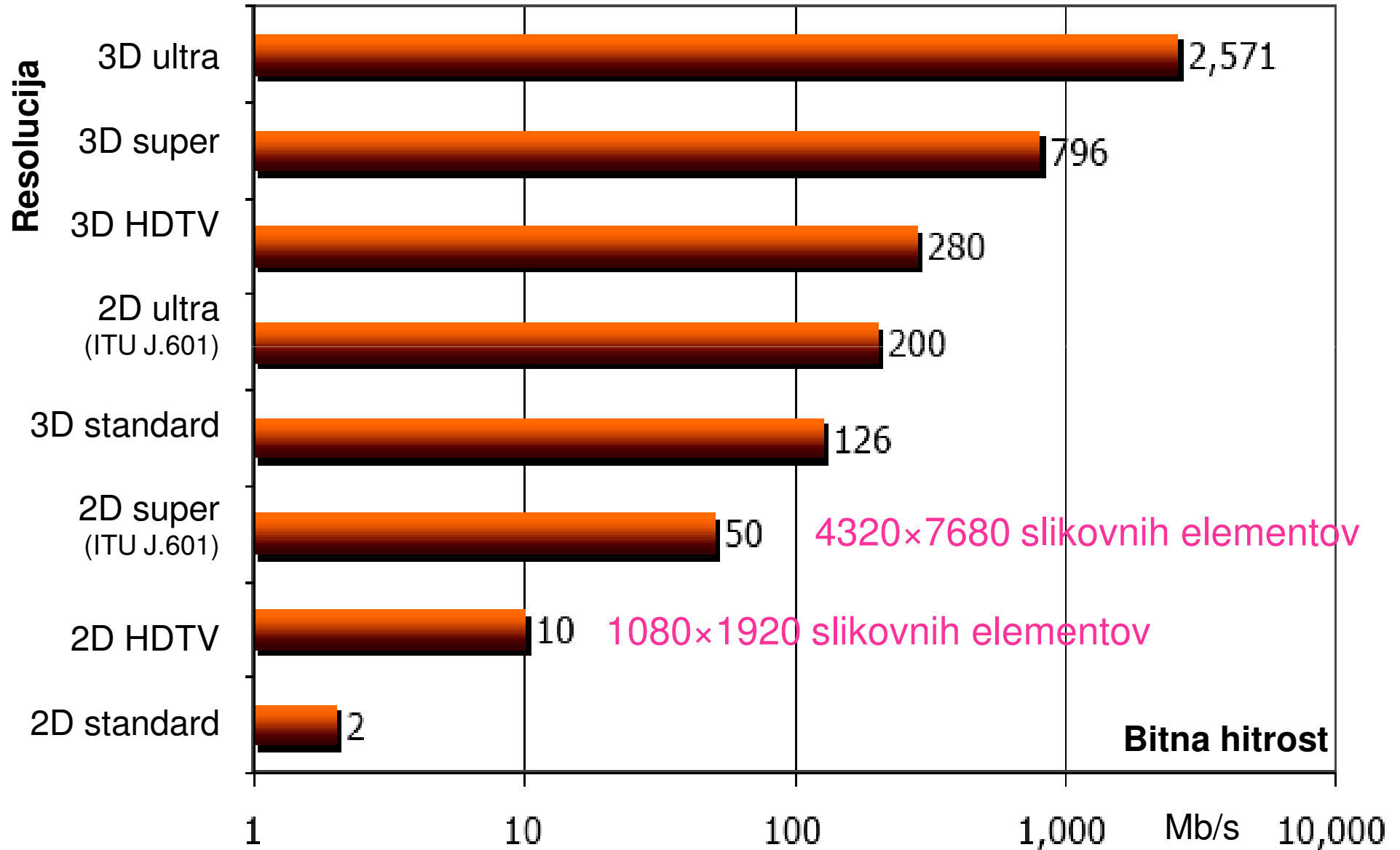
# Dosežki v optičnih komunikacijah

1. Miliarda km doslej položenega vlakna (25.000 krat okoli Zemlje).
2. Tisoči km položenega vlakna vsako uro.
3. Prehod s **KILO** b/s na **MEGA** b/s, od **GIGA** b/s preko **TERA** b/s do **PETA** b/s ter sedaj do **EXA** b/s (v prihodnje morda še **ZETTA** b/s) skupne prenašane informacije v svetovnem omrežju zaznamuje revolucionarno rast področja optičnih komunikacij.
4. Lokalne in globalne širokopasovne komunikacije, internet in vse, kar še pride.
5. Danes vemo, da informacijska revolucija brez vlakna ne bi bila mogoča.
6. Delitev: Radijske komunikacije, **mobilne zveze**  
Optične komunikacije, **stacionarne zveze**

# Predvidevanje rasti omrežnega prometa



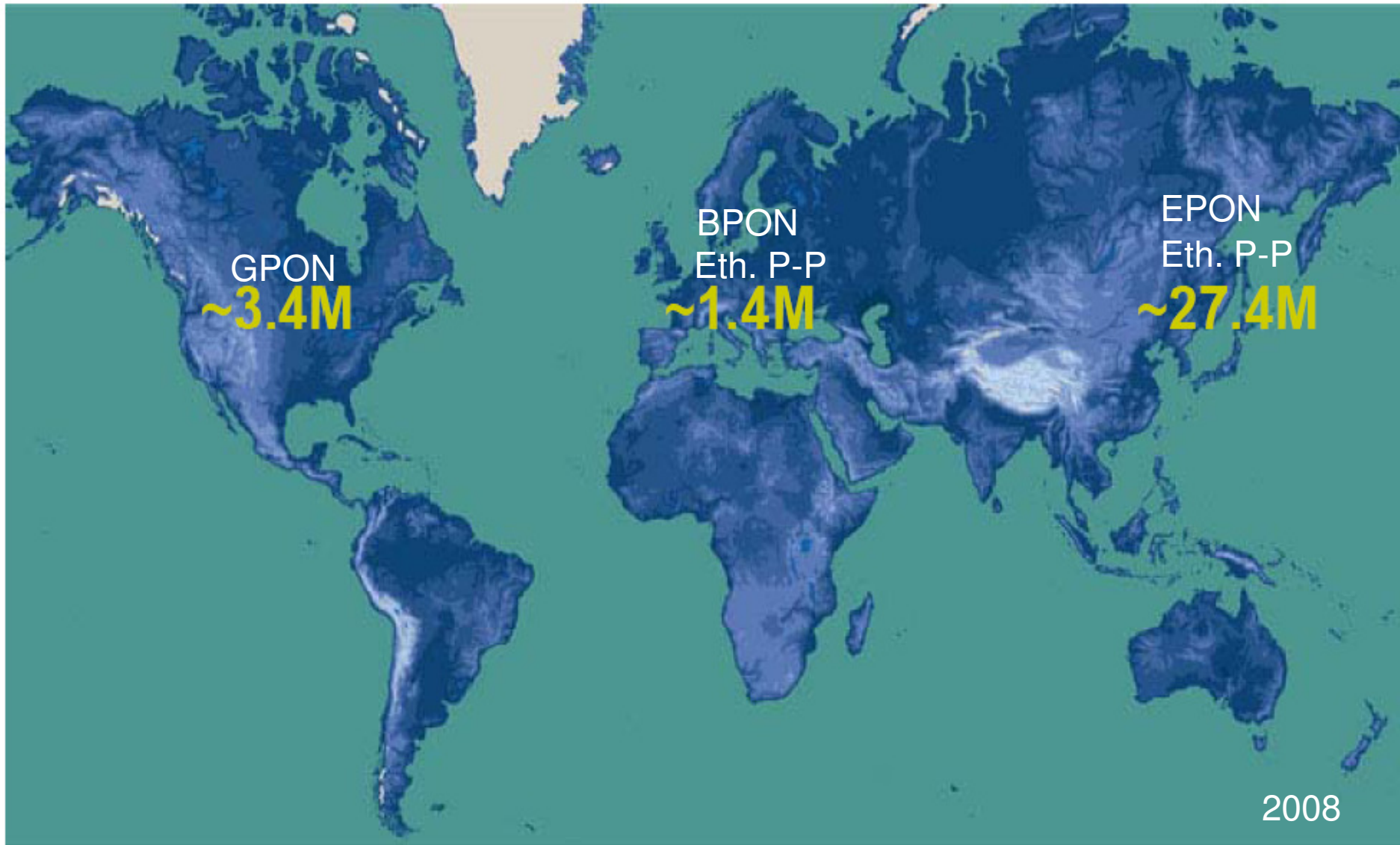
# Napovedi bitne hitrosti za sprejem 2D in 3D televizije različne resolucije do leta 2030



# Razvoj bitne hitrosti 1990 - 2020

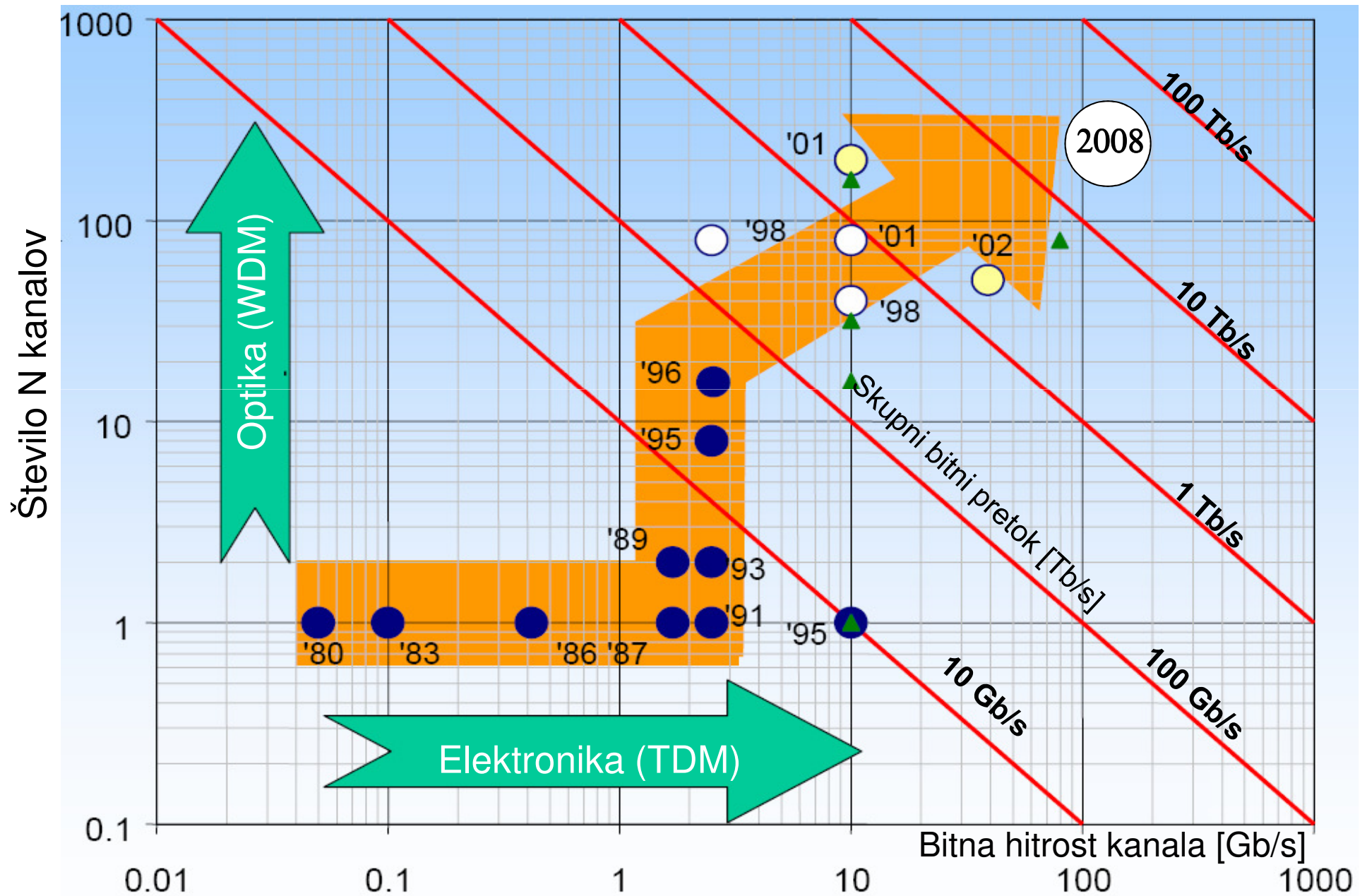
Leto (obdobje)	1990+	2000+	2010+	2020
Bitna hitrost kanala	2,5 Gb/s	10 Gb/s	100 Gb/s	1 Tb/s
Število kanalov	8, 16, 40	do 100	100	100
Kapaciteta	20-160 Gb/s	1 Tb/s	10 Tb/s	100 Tb/s
Spektralni izkoristek	0,025-0,05	0,2	2,0	20

# Število naročnikov po svetu, 2008





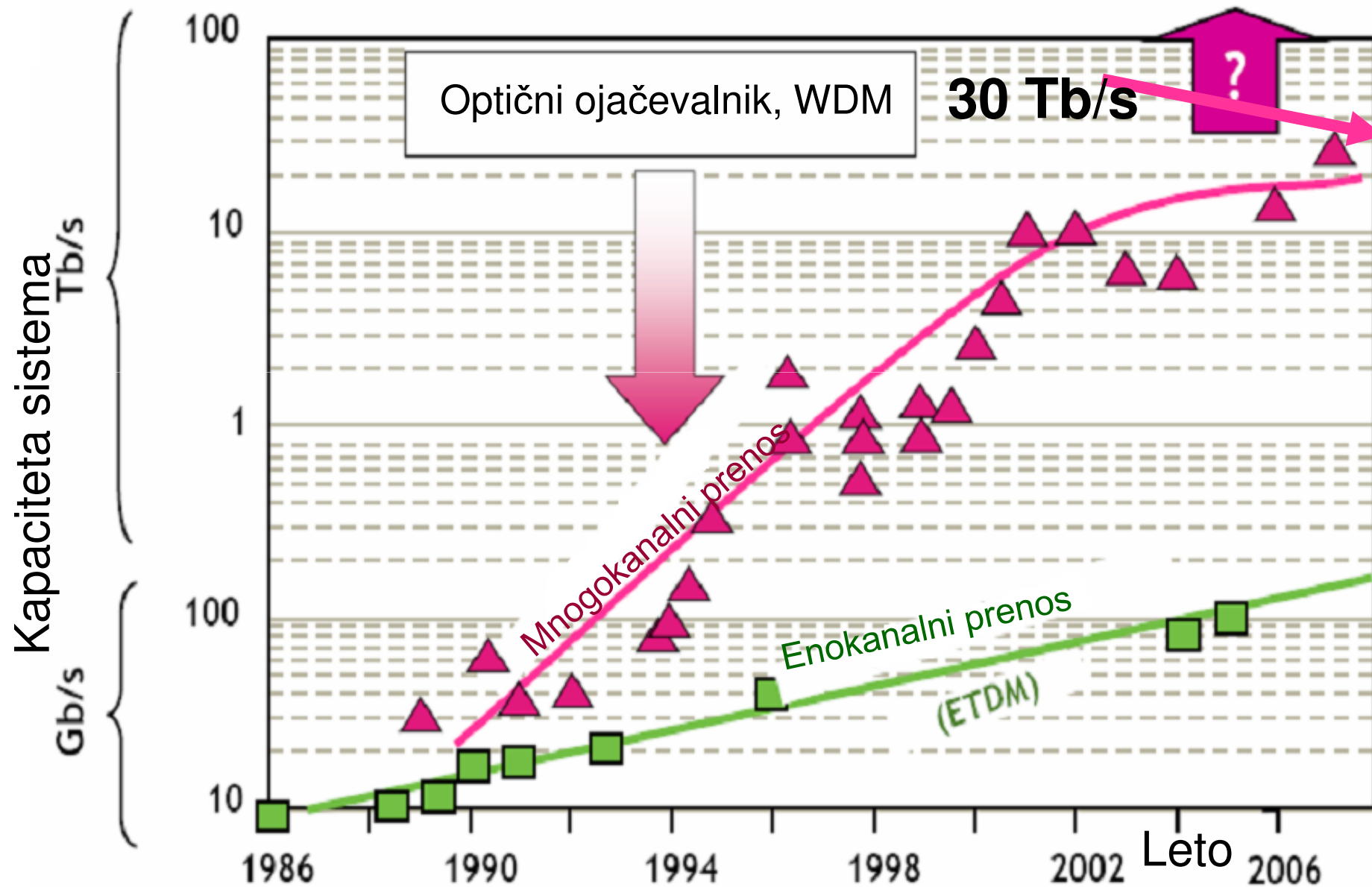
# Bitna hitrost–delež elektronike in optike





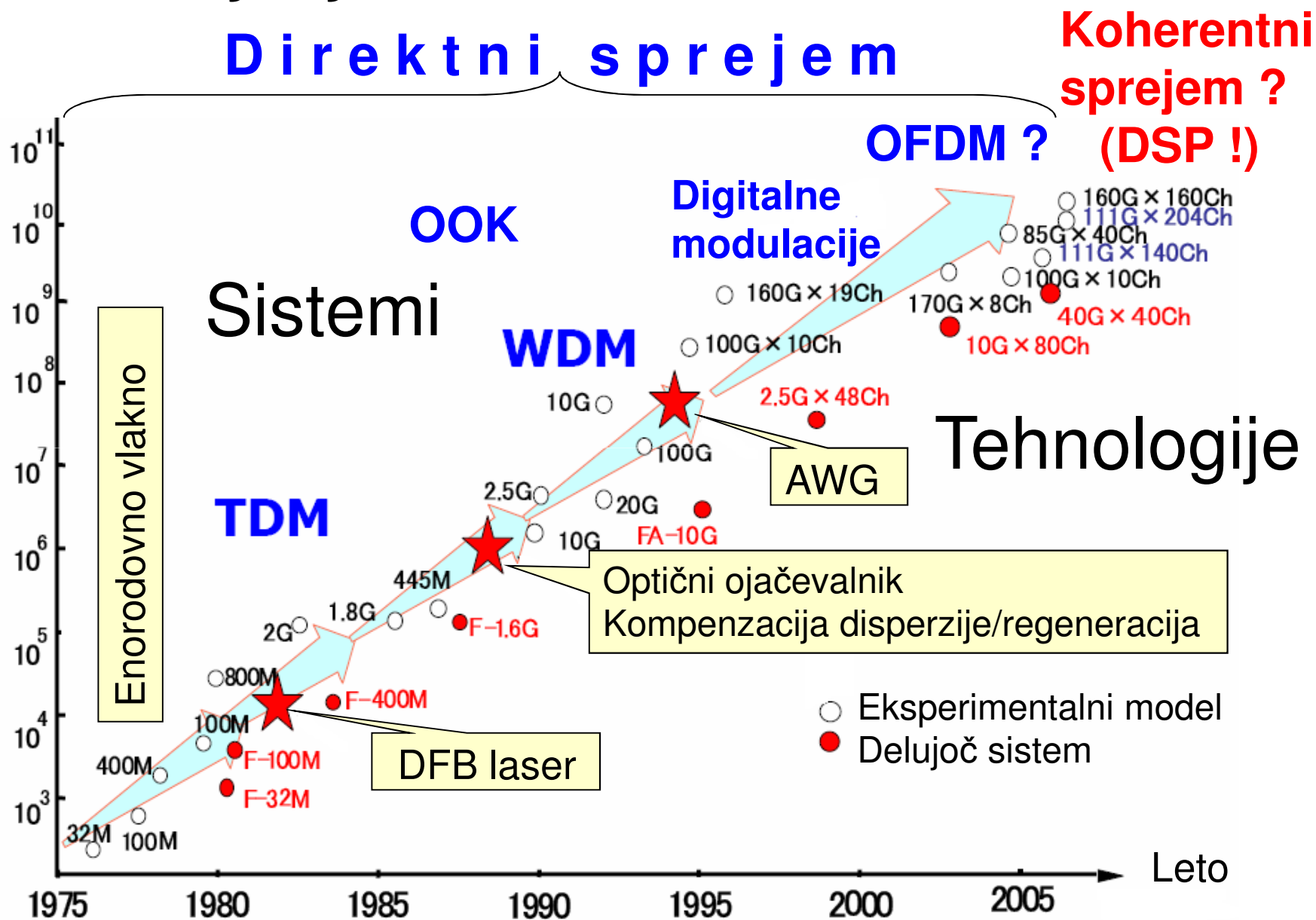
# Rast kapacitete eno- in mnogokanalnih sistemov

APOC 2008

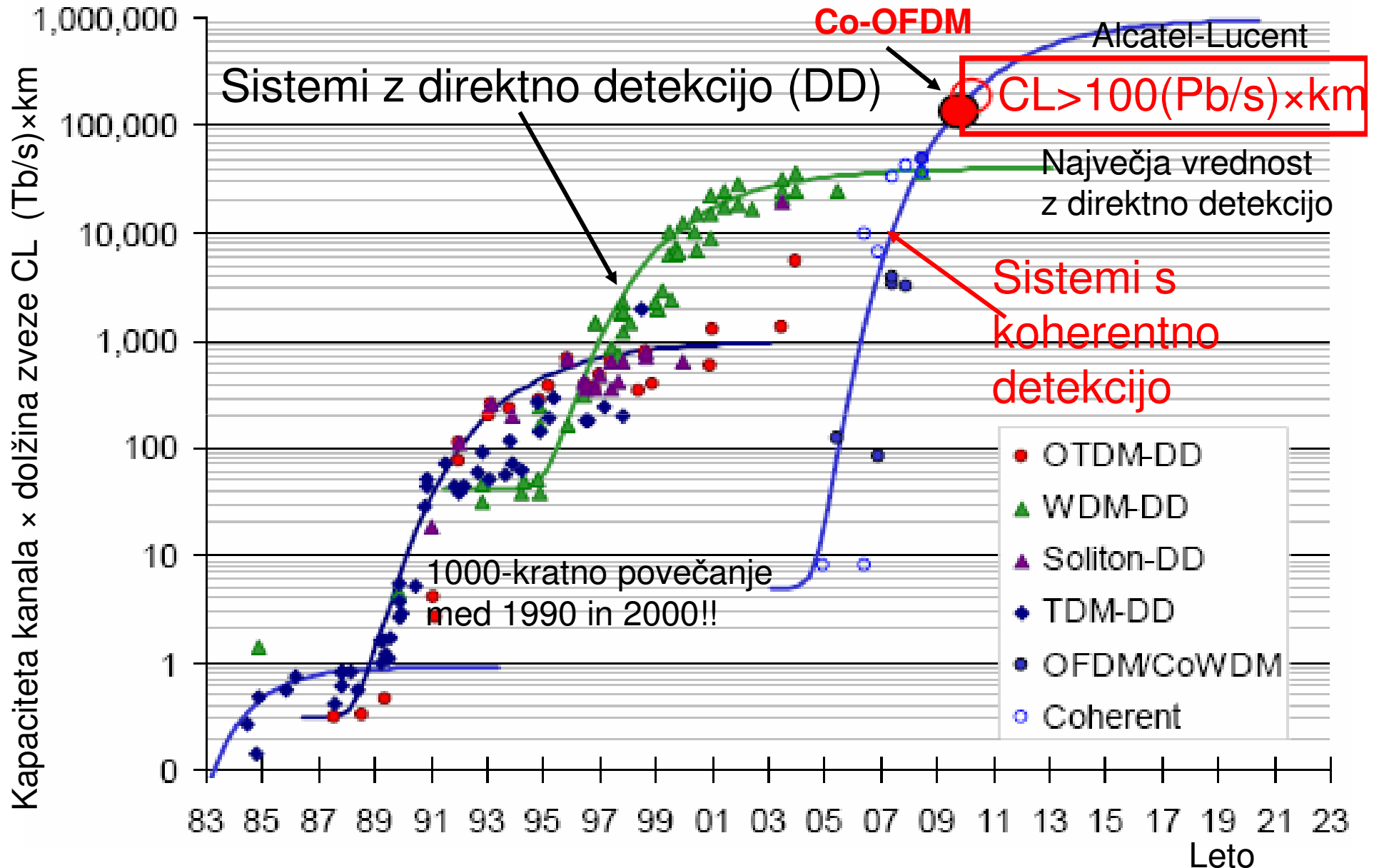


# Razvoj ključnih delov in sistemov

B x L - Bitna hitrost B (Mb/s) x Dolžina vlakna L (km)



# Zmogljivost sedanjih in prihodnjih sistemov



Koherentni sistemi v l. 2010 že presegajo dosedanje sisteme z direktno detekcijo

# Razvoj bitne hitrosti 1990 - 2020

Tkach, APOC 2008

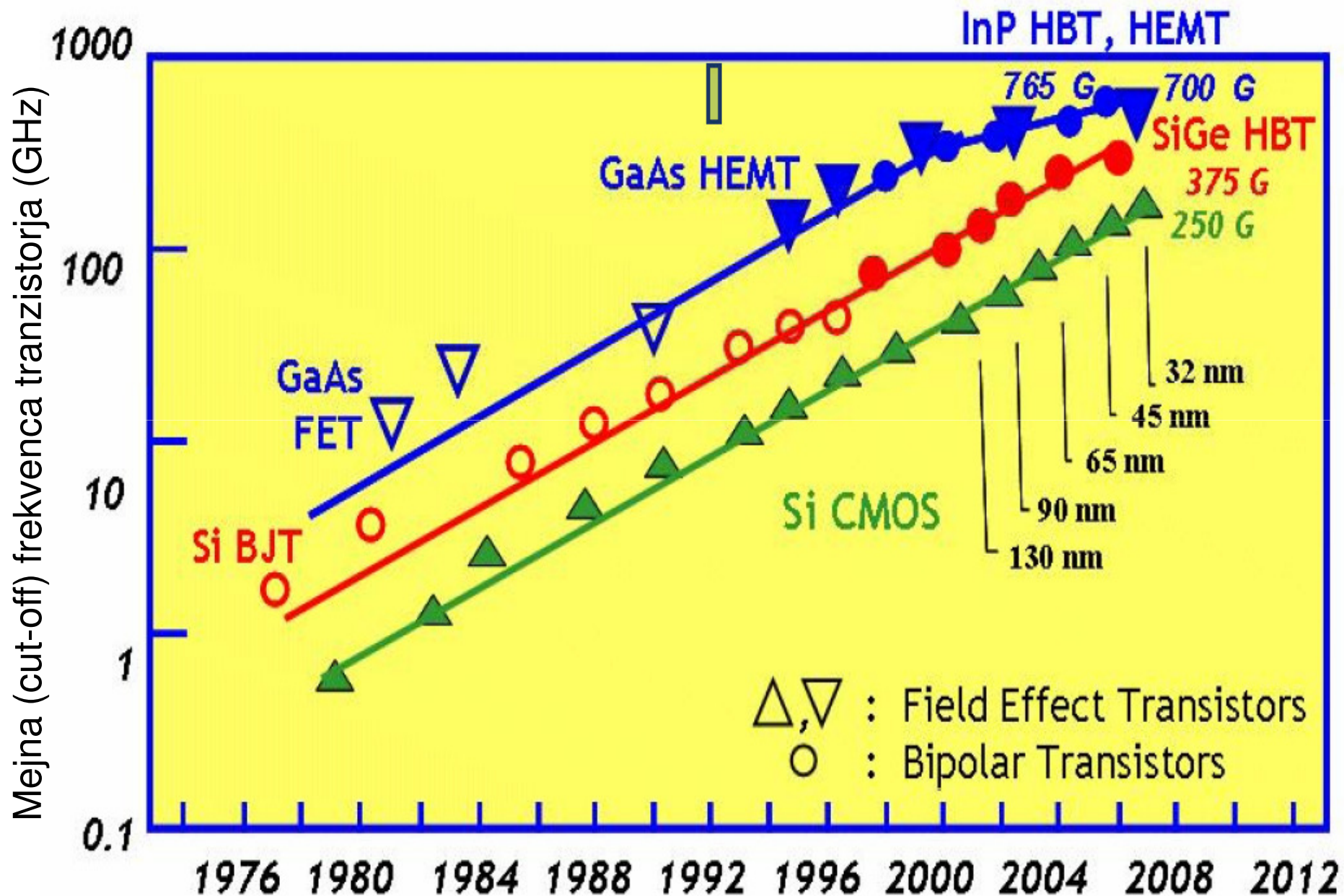
## PRETEKLOST

## PRIHODNOST

1990	2000	2100	2200?
Bitna hitrost: <b>2,5–10 Gb/s</b>	Bitna hitrost: <b>10 Gb/s</b>	Bitna hitrost: <b>100 Gb/s</b>	Bitna hitrost: <b>1 Tb/s</b>
Št. kanalov: <b>8, 16, 40</b>	Št. kanalov: <b>do 100</b>	Št. kanalov: <b>100</b>	Št. kanalov: <b>100</b>
Kapaciteta: <b>20-160 Gb/s</b>	Kapaciteta: <b>1 Tb/s</b>	Kapaciteta: <b>10 Tb/s</b>	Kapaciteta: <b>100 Tb/s</b>
Spek. izk.: <b>0,025-0,05</b>	Spek. izk.: <b>0,2</b>	Spek. izk.: <b>2,0</b>	Spek. izk.: <b>10 - 20</b>

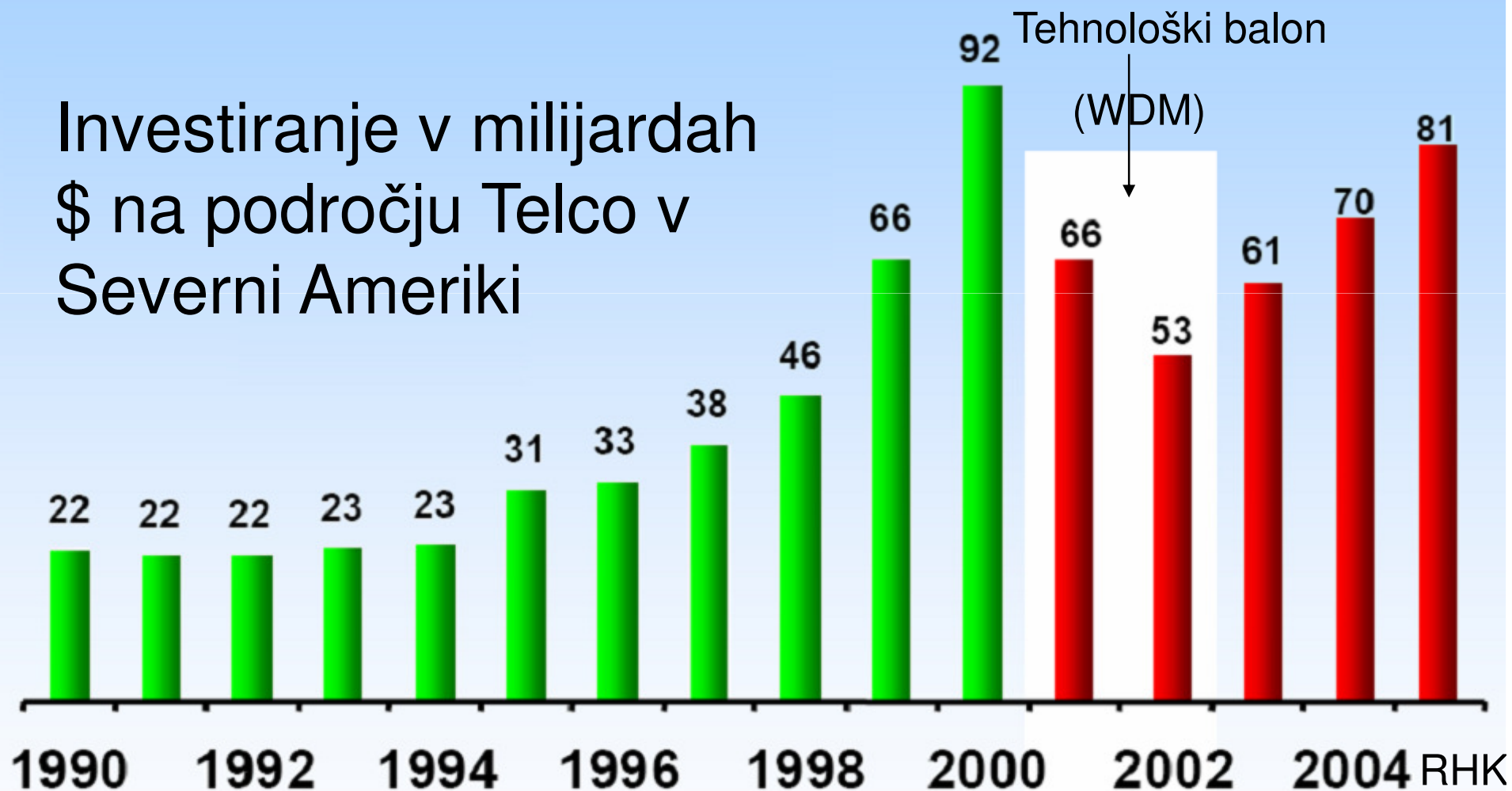
**Kapaciteta 1 Tb/s ustreza 15 milionom telefonskih pogovorov 64 kb/s.**

# Razvoj elektronskih tehnologij z leti



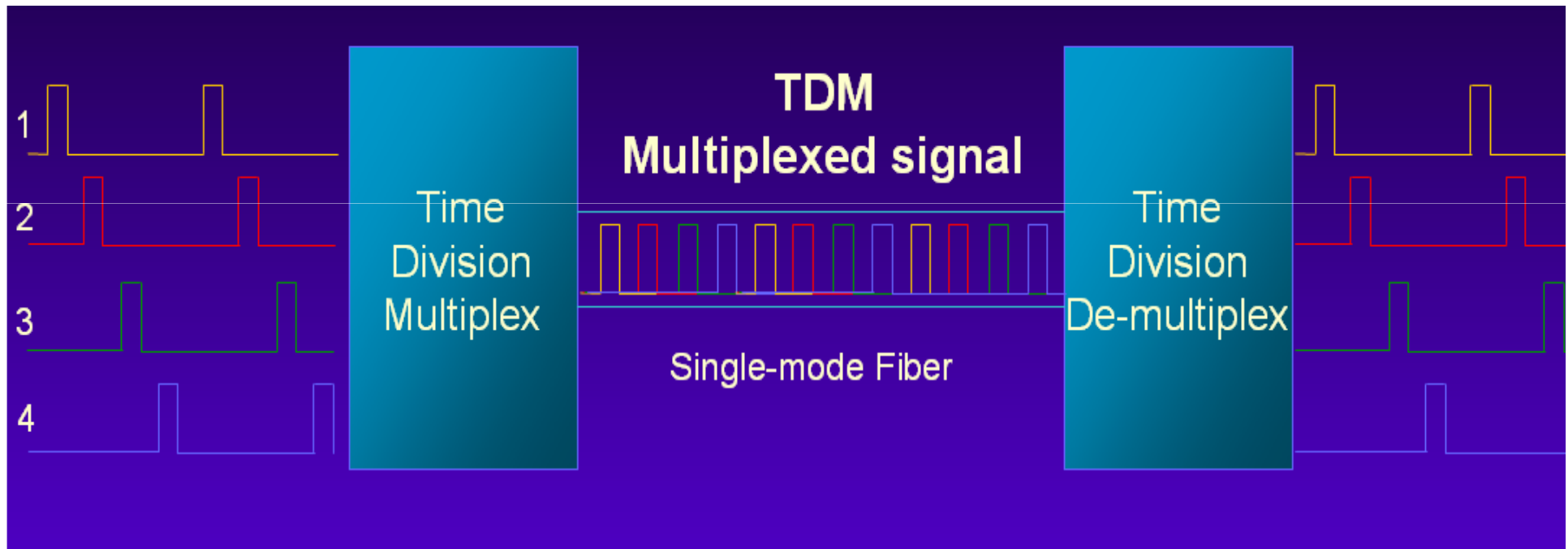
# Optične komunikacije – vlaganja v ZDA

Investiranje v milijardah \$ na področju Telco v Severni Ameriki

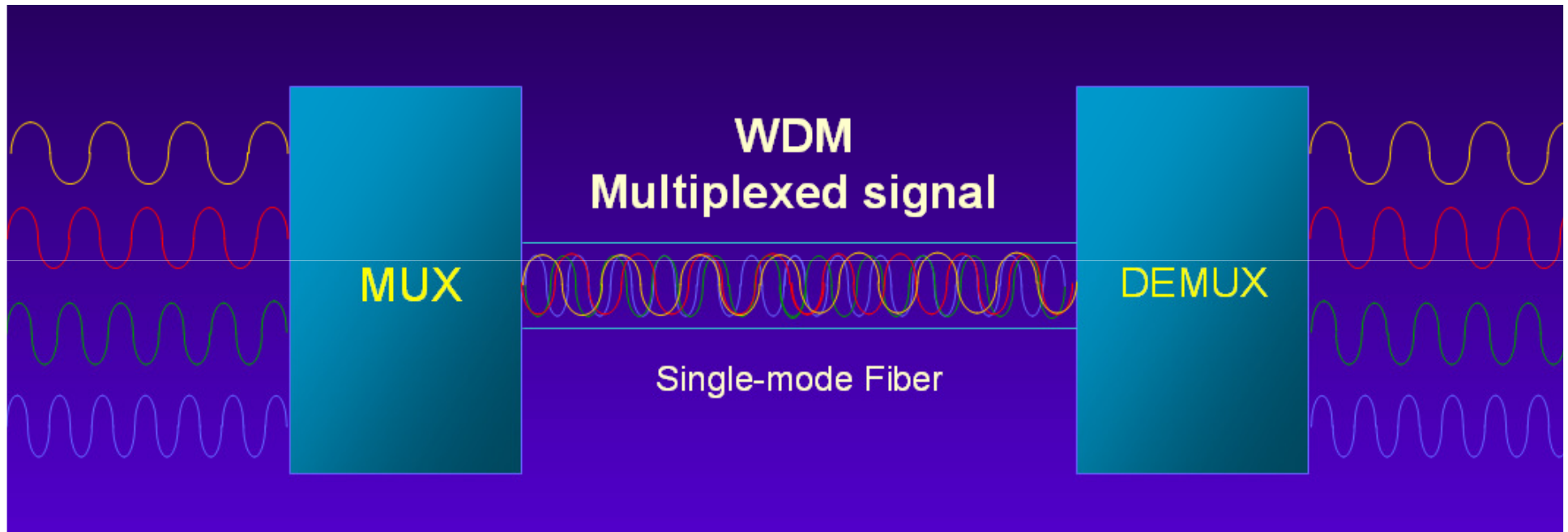




# Časovno multipleksiranje

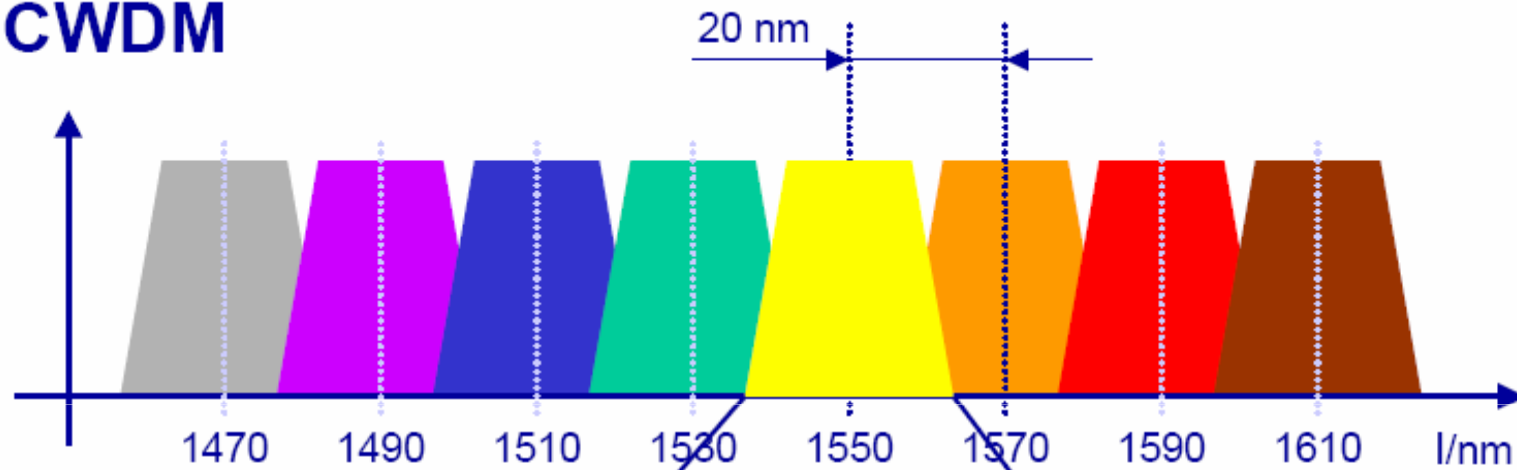


# Barvno (WDM) multipleksiranje

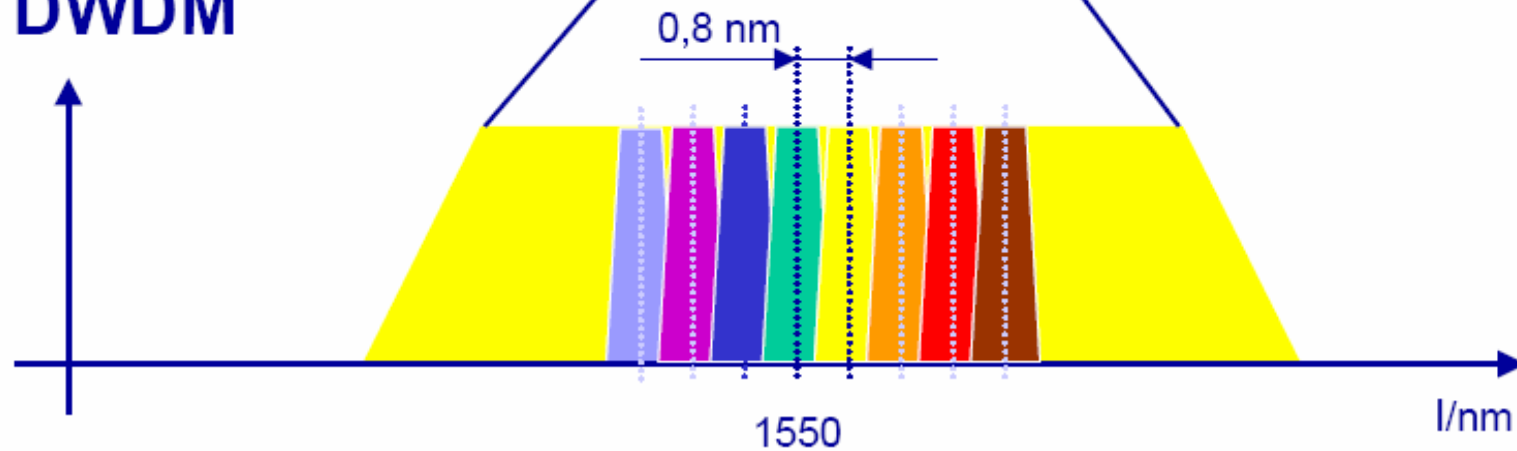


# Barvno (WDM) multipleksiranje

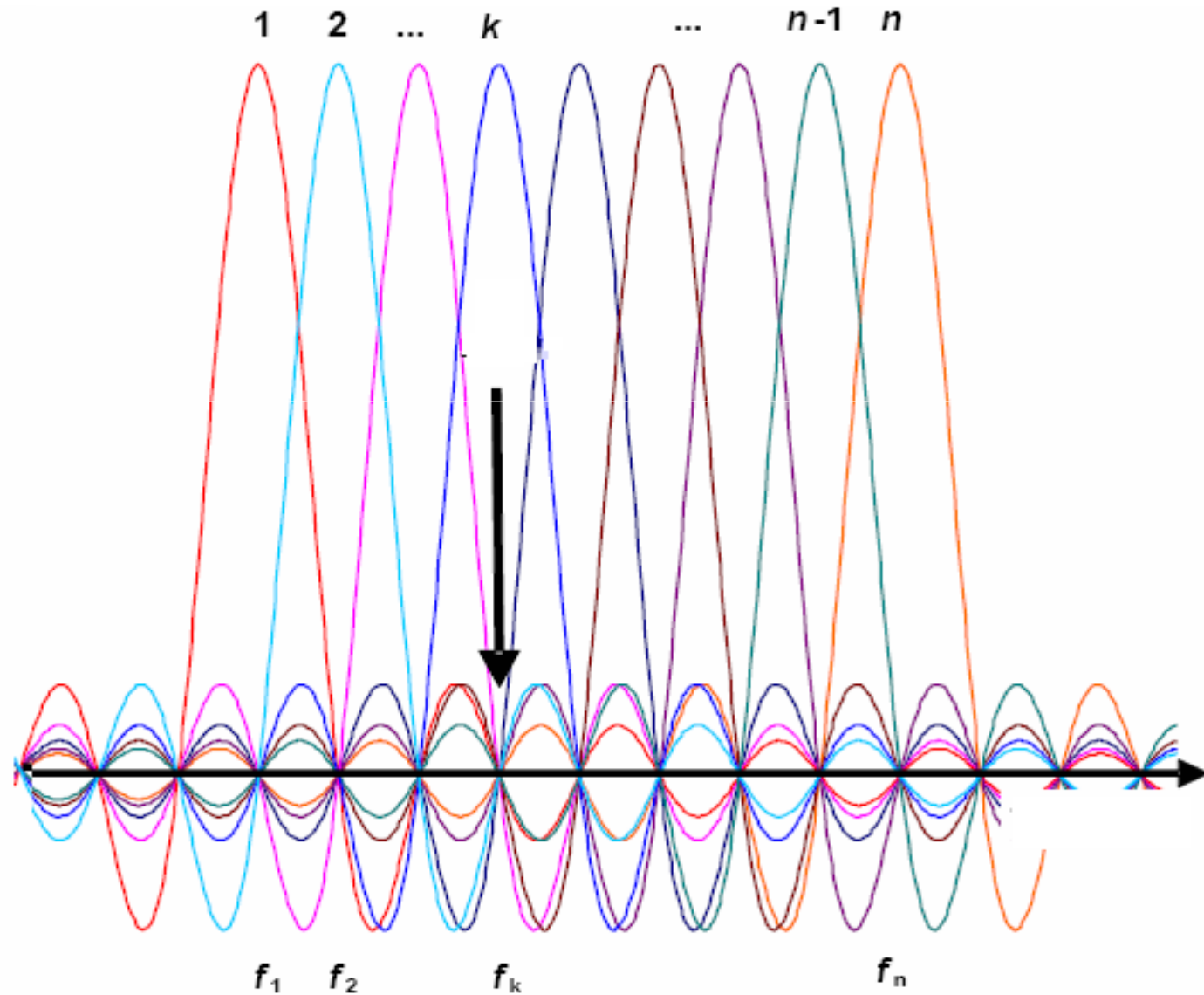
**CWDM**



**DWDM**



# Ortogonalno frekvenčno multipleksiranje



# Shannon

Bell Labs Journal, 1948

C kapaciteta AWGN kanala v b/s,  
ki je ni mogoče preseči

$$C \leq \Delta f \log_2(1 + S/N), \text{ b/s}$$

$\Delta f$  širina pasu v Hz

S signalna moč v W

N šumna moč v W

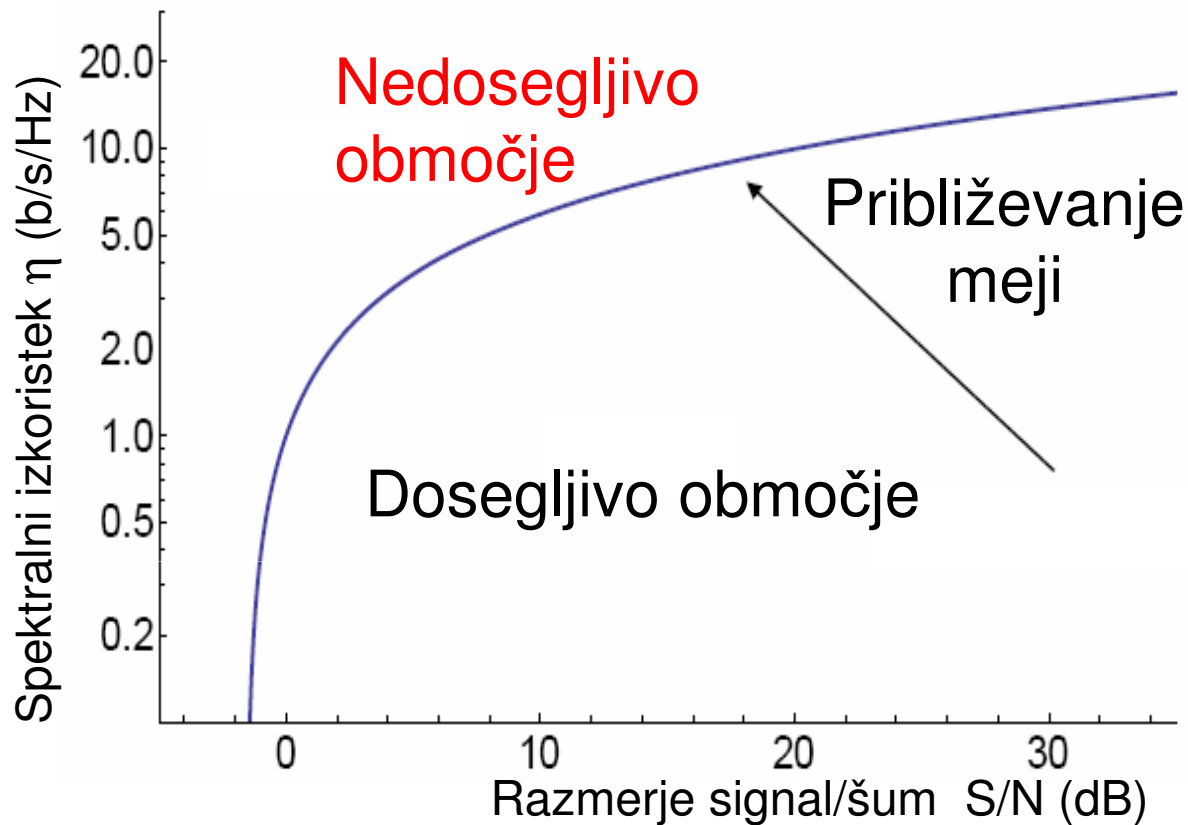
$C/\Delta f$  spektralni izkoristek kanala  
v b/s/Hz, ki ga ni mogoče  
preseči.

$$C/\Delta f \leq \log_2(1 + S/N), \text{ b/s/Hz}$$

Pri  $S/N = 1$  dobimo 1b/s/Hz



# Shannonova mejna kapaciteta kanala



Načini doseganja večjega spektralnega izkoristka:

- Večje razmerje S/N
- Zahtevnejši modulacijski formati
- Dva polarizacijsko ortogonalna kanala
- OFDM in koherentni sprejem

$$B \leq C \quad \text{b/s}$$

$$C = \Delta f \log_2(1 + S/N)$$

$$\eta = C/\Delta f$$

$$S = E_b B$$

$$N = N_0 \Delta f$$

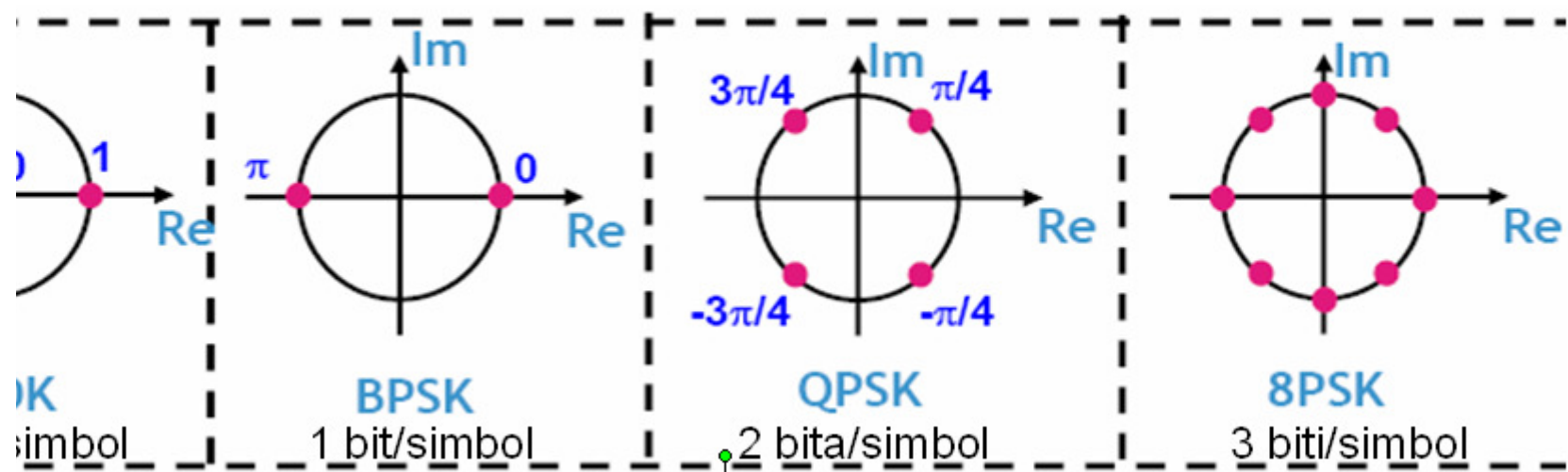
$$C = \Delta f \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_0 \Delta f} \right)$$

Kapaciteta v optiki:

$$C_\infty = \frac{P}{N_0} \log_2 e$$



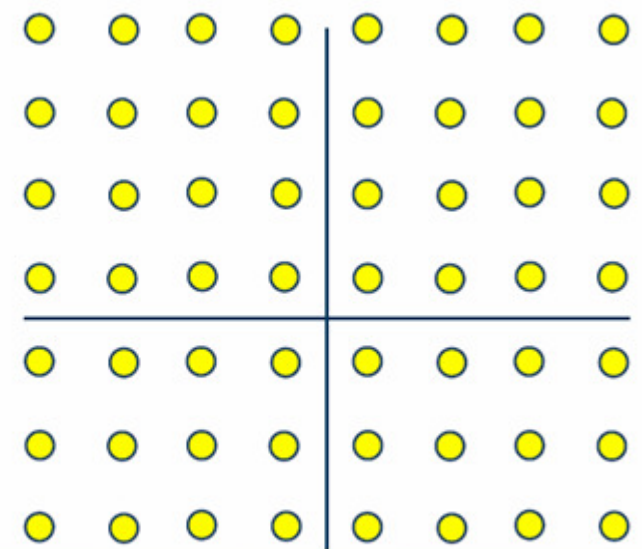
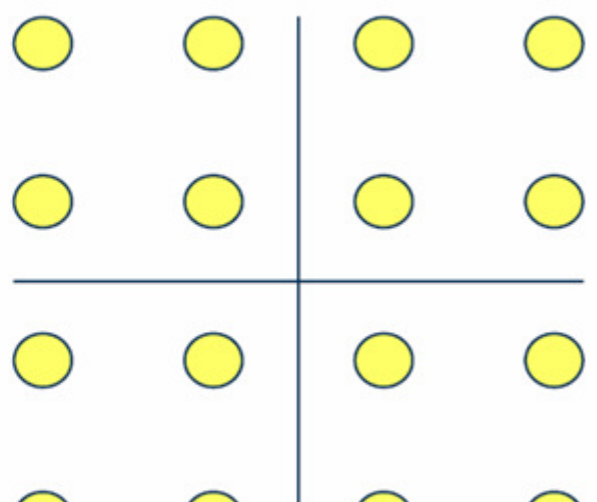
# Modulacija nekaterih digitalnih formatov



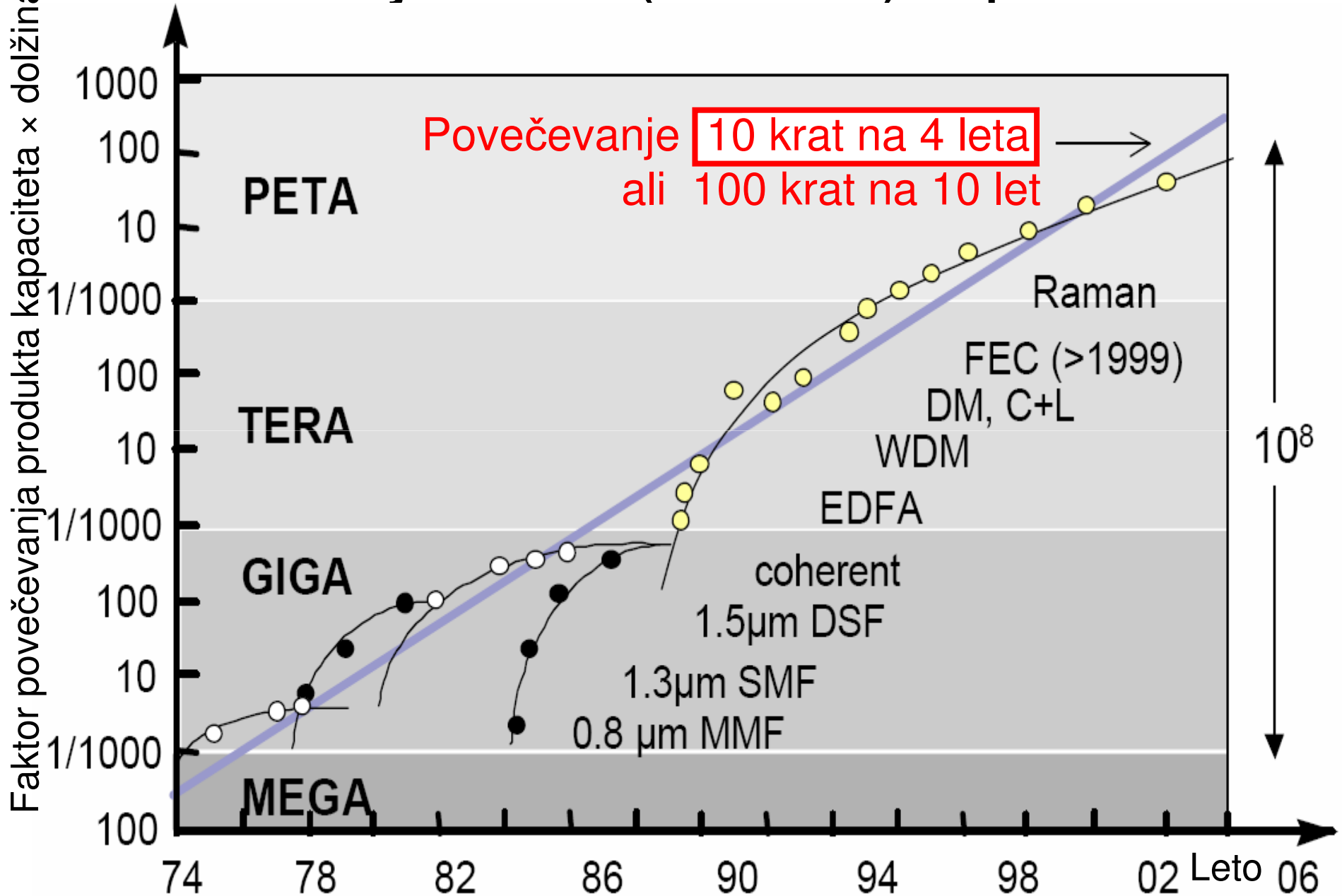
QAM:

6 bitov/  
simbol

Q

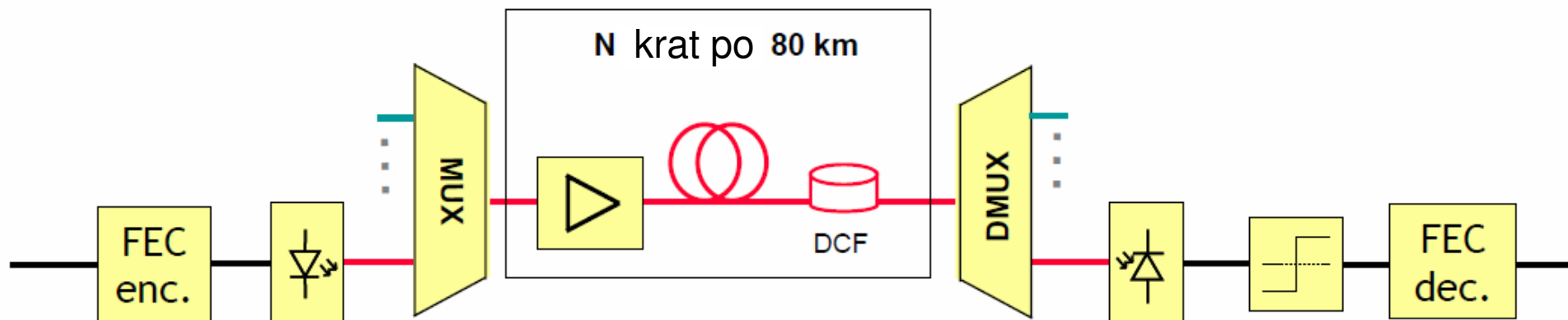


# Povečevanje $C \times L$ (b/s km) v preteklosti



# Optična zveza

- Konvencionalna vlakenska zveza na večje razdalje



## Funkcije:

- FEC, kodiranje
- Oddajnik, modulacija (IM-RZ, NRZ)
- Multipleksiranje: časovno, valovno, kodno razvrščanje
- Vlakensko ojačevanje ali regeneracija
- Prenos po odseku vlakna, N krat
- Kompenzacija disperzije
- Demultipleksiranje
- Sprejemnik, detekcija (DD)
- Ojačevanje v osnovnem pasu
- FEC, dekodiranje

Z novimi tehnologijami se bo prihodnja vlakenska zveza močno spremenila. Sedanji sistem OK (OOK IM/DD) izhaja iz nekdanje telegrafije oz. iz radijskih komunikacij pred preходом na analogno modulacijo. Prihodnji sistem OK naj bi se s preходом na koherentni sprejem približal radijskim komunikacijam.

# Optične tehnologije, pomen $C \times L$

Večanje kapacitete  $C$  (b/s):

**Ovira:** kromatska disperzija, pol. rodovna disperzija PMD

**Način:**

- časovni multipleks, ETDM, OTDM
- valovno-dolžinski multipleks (gosti) DWDM
- digitalni modulacijski formati QPSK, QAM
- koherentni sprejem CO z DSP
- Ortog. frekvenčni multipleks OFDM

Večanje dolžine  $L$  (km):

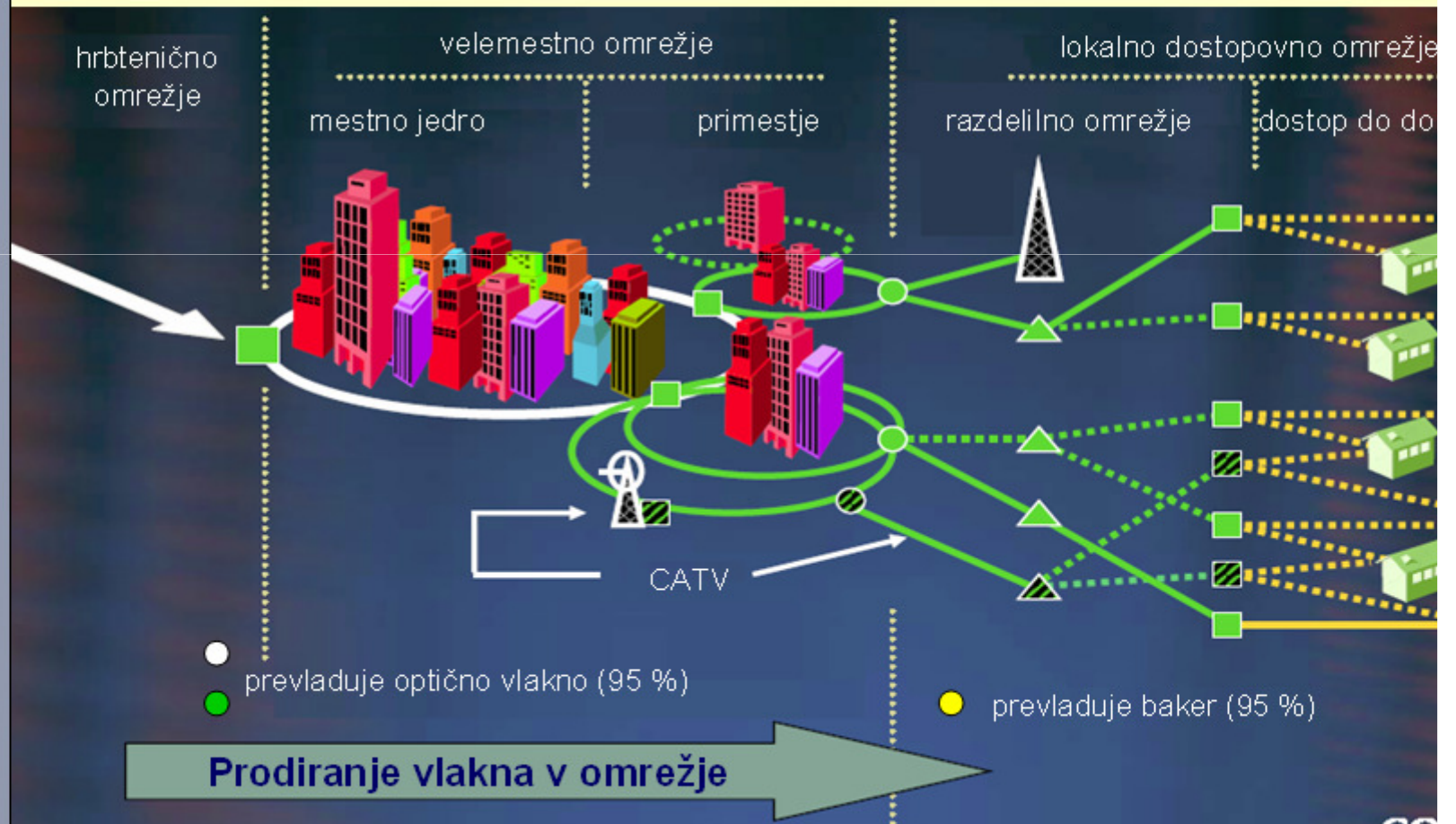
**Ovira:** slabljenje, nelinearnost

**Način:**

- Zniževanje slabljenja vlakna SMF, PCF?
- Erbijev vlakenski ojačevalnik, EDFA, Ramanov vlakenski ojačevalnik RA
- Solitoni (ni aktualno)
- Koherentni sprejem CO
- Ortog. frekvenčni multipleks OFDM

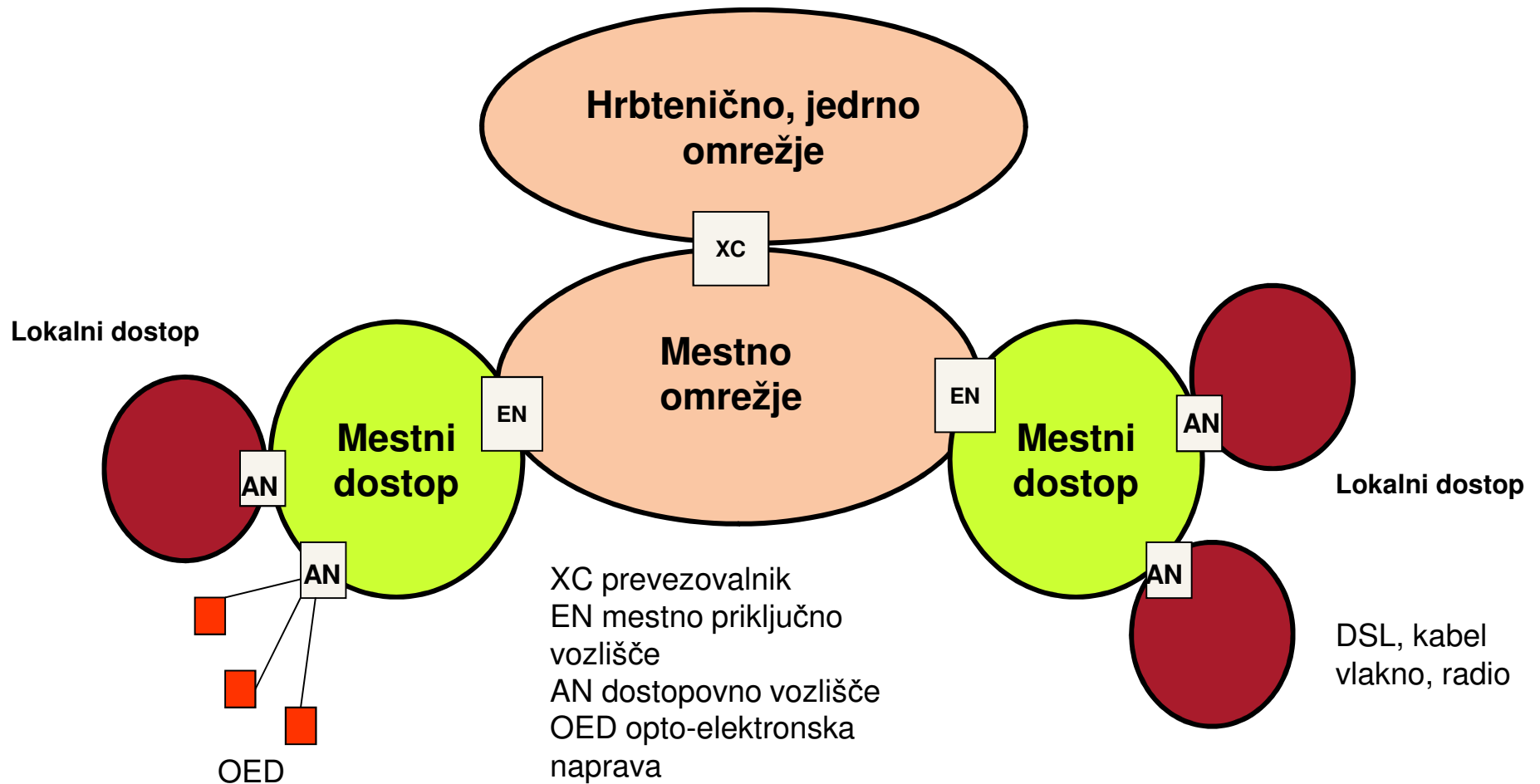
# OPTIČNA OMREŽJA – dostopovno omrežje

- hrbtenično omrežje
- (vele)mestno omrežje
- lokalno dostopovno omrežje
- kabelski dostop
- (jedrno omrežje)
- jedro
- lokalo razdelilno omrežje
- vlakenski dostop
- regionalno omrežje
- mestno obrobje
- hibridni dostop
- radijski dostop



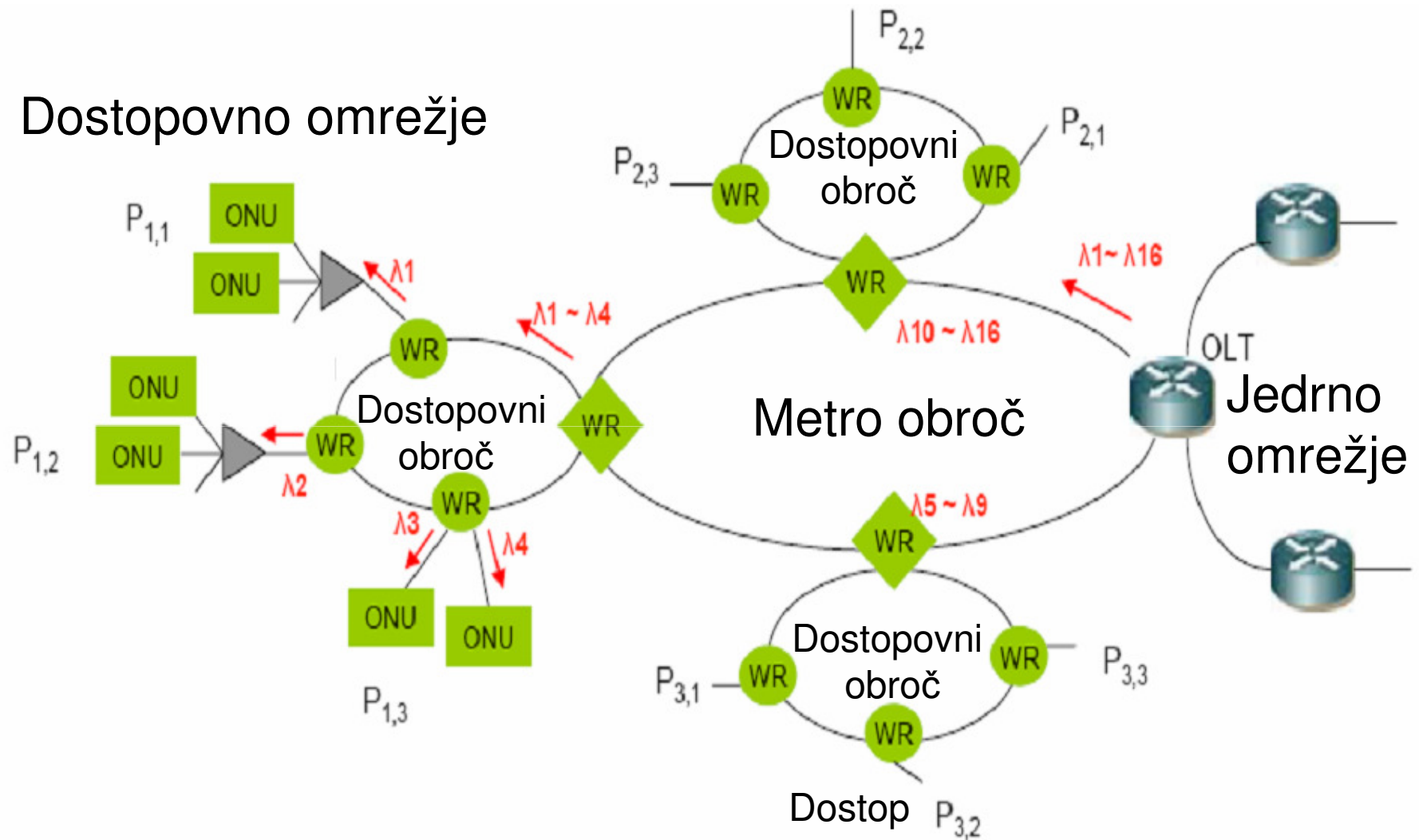


# Hierarhija omrežij



# Hierarhija omrežja

Dostopovno omrežje



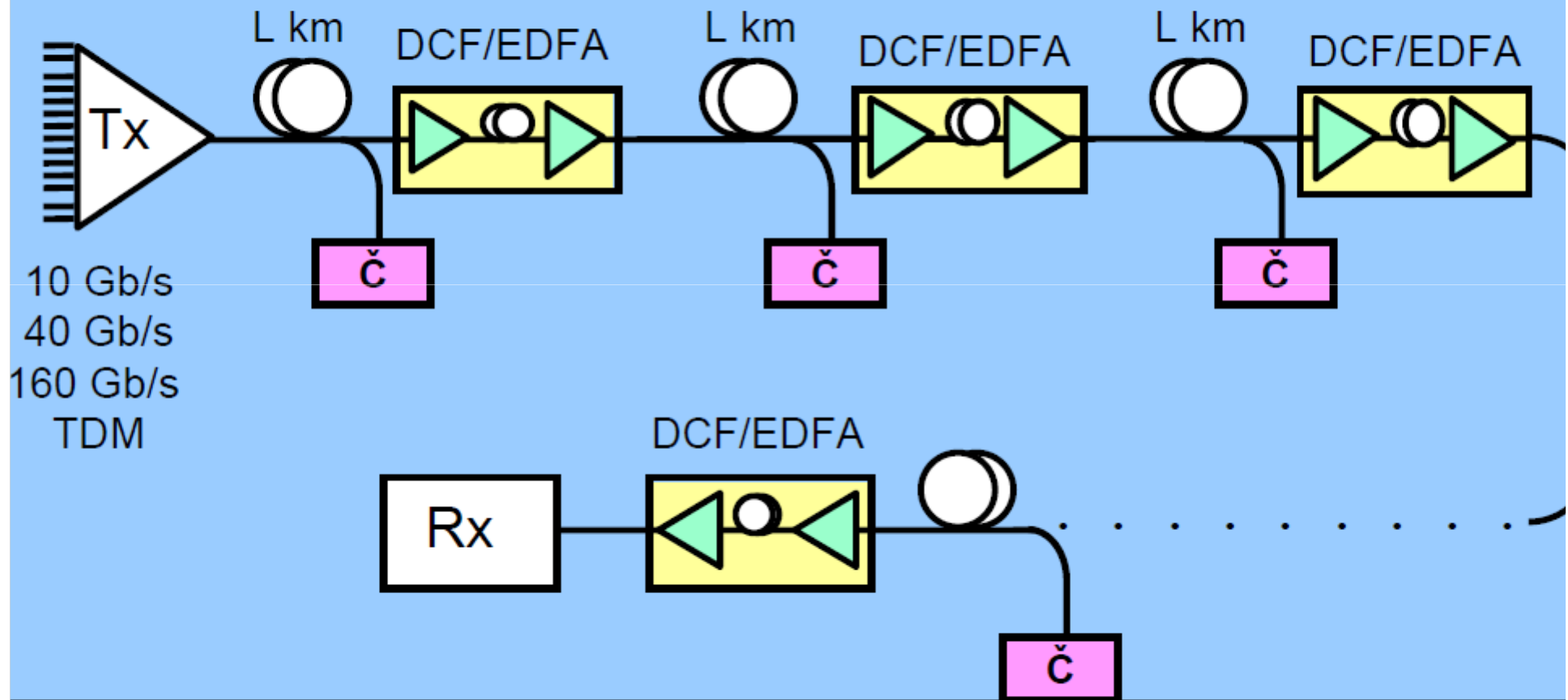
100 Km

ETRI Korea, 2008

# HRBTENIČNA OPTIČNA ZVEZA WDM/TDM

- razdalja med optičnimi ojačevalniki 60 – 100 km
- razdalja med regeneratorji (3R) 500 – 1000 km

N kanalov  
WDM



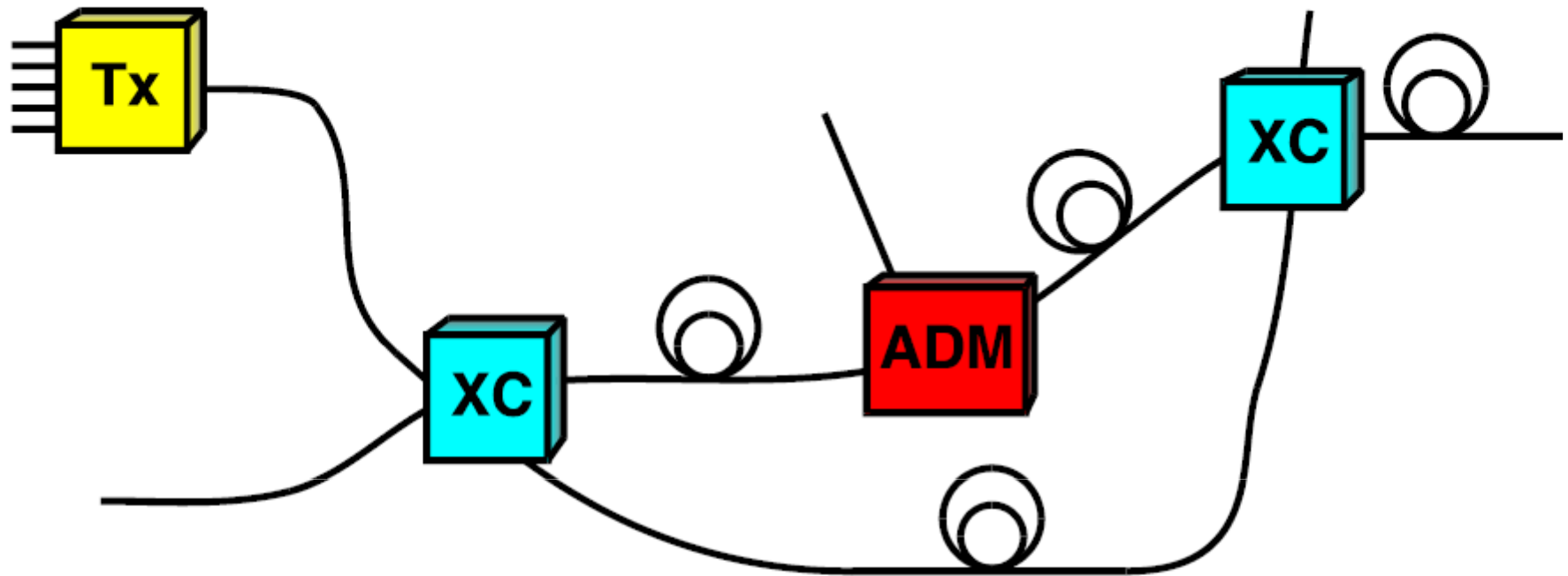
EDFA - vlakenski erbijev ojačevalnik

DCF - vlakno za disperzijsko kompenzacijo

Č-ramanske črpalke

# What system do we want to have?

---



- 50 Tbit/s over unlimited distance (min. 27500km including XC, ADM,  $\lambda$  re-use advanced networking functions)
- Not likely without 3R repeaters !

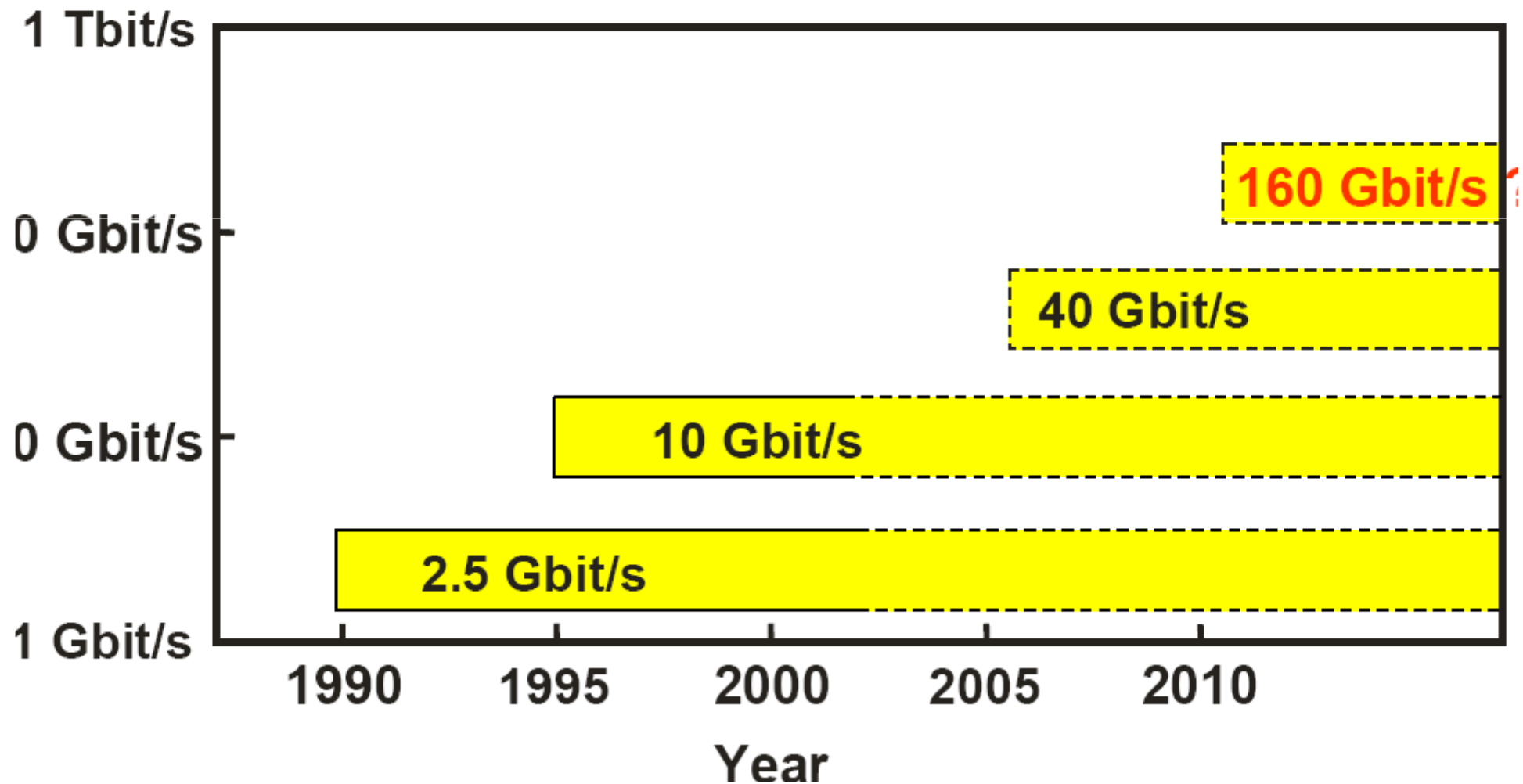


# DM Bitrate per WDM-Channel

---

Channel  
Bitrate

**Commercial Systems**



# Dolgoročni razvojni trendi

- **Koherentni sprejem** kot končna rešitev v **transportnih** in **dostopovnih** omrežjih (razvoj procesiranja DSP)
- **WDM-PON** kot končna rešitev v dostopovnih omrežjih
- Uvajanje **OFDM** v transportno in dostopovno(?) omrežje
- Povečana bitna hitrost kanalov  $\gg 100$  Gb/s
- Povečan spektralni izkoristek  $\gg 1$  bit/s/Hz
- Zahtevnejši modulacijski formati

# Stanje

- FTTx tržišče strmo narašča, DSL stagnira.
- 2008: 35 milijonov naročnikov FTTH/B.
- 2012: 112 milijonov naročnikov FTTH/B.
- Sedanji in potencialni graditelji GPON-a: Verizon, AT&T, France Telecom, British Telecom, Deutsche Telekom, Telenor itd.
- Graditelji EPON-a: Cisco, NTT, KDDI
- EU graditelji Eth. P-P: Orange, Neuf, Erenis, CiteFibre, Telefonica, Iliad/Free, Citynet, Fastweb.

# Dostopovna omrežja

FTTx FTTP FTTH

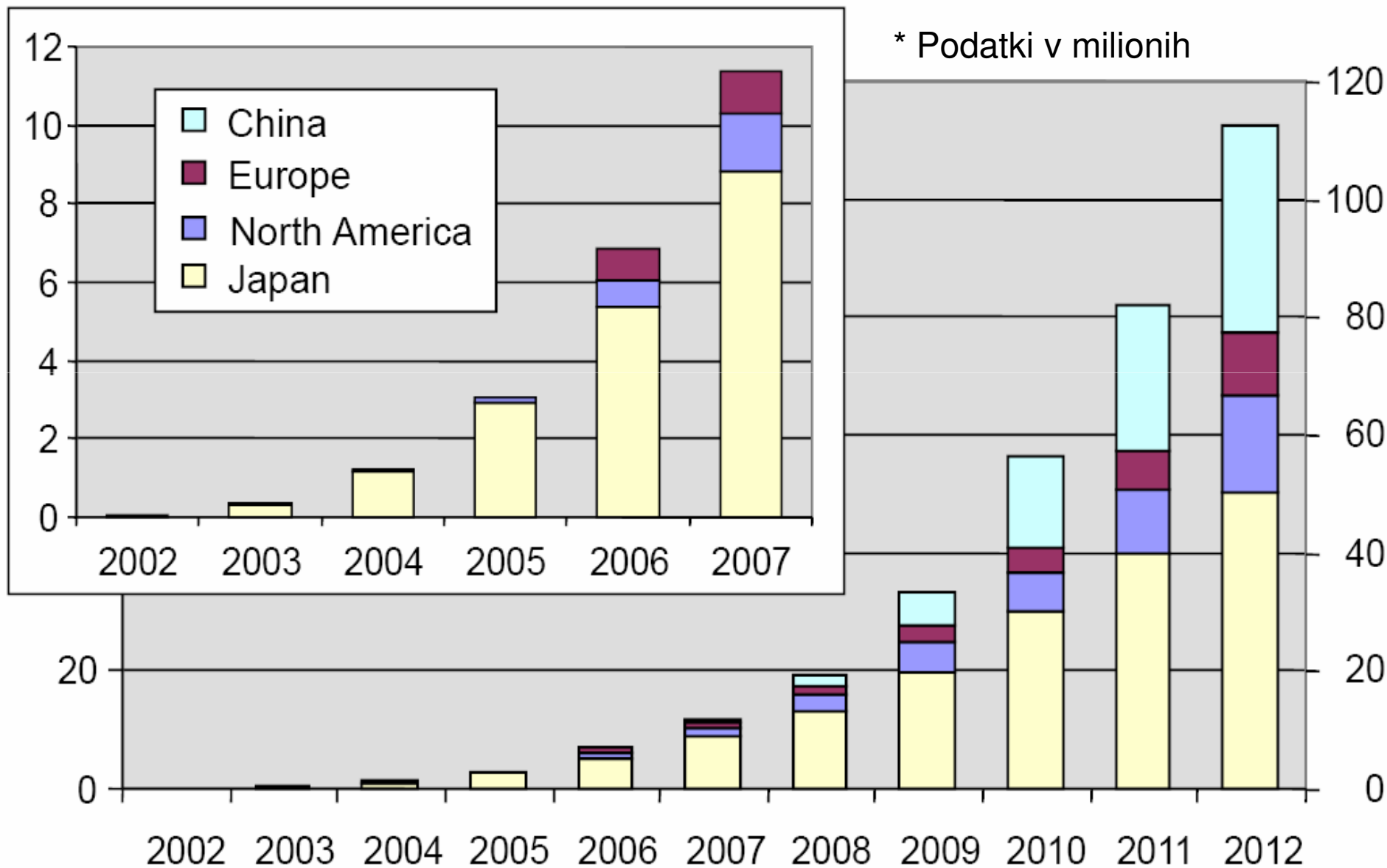
FTTB FTTU FTTA

FTTD FTTO FTTZ

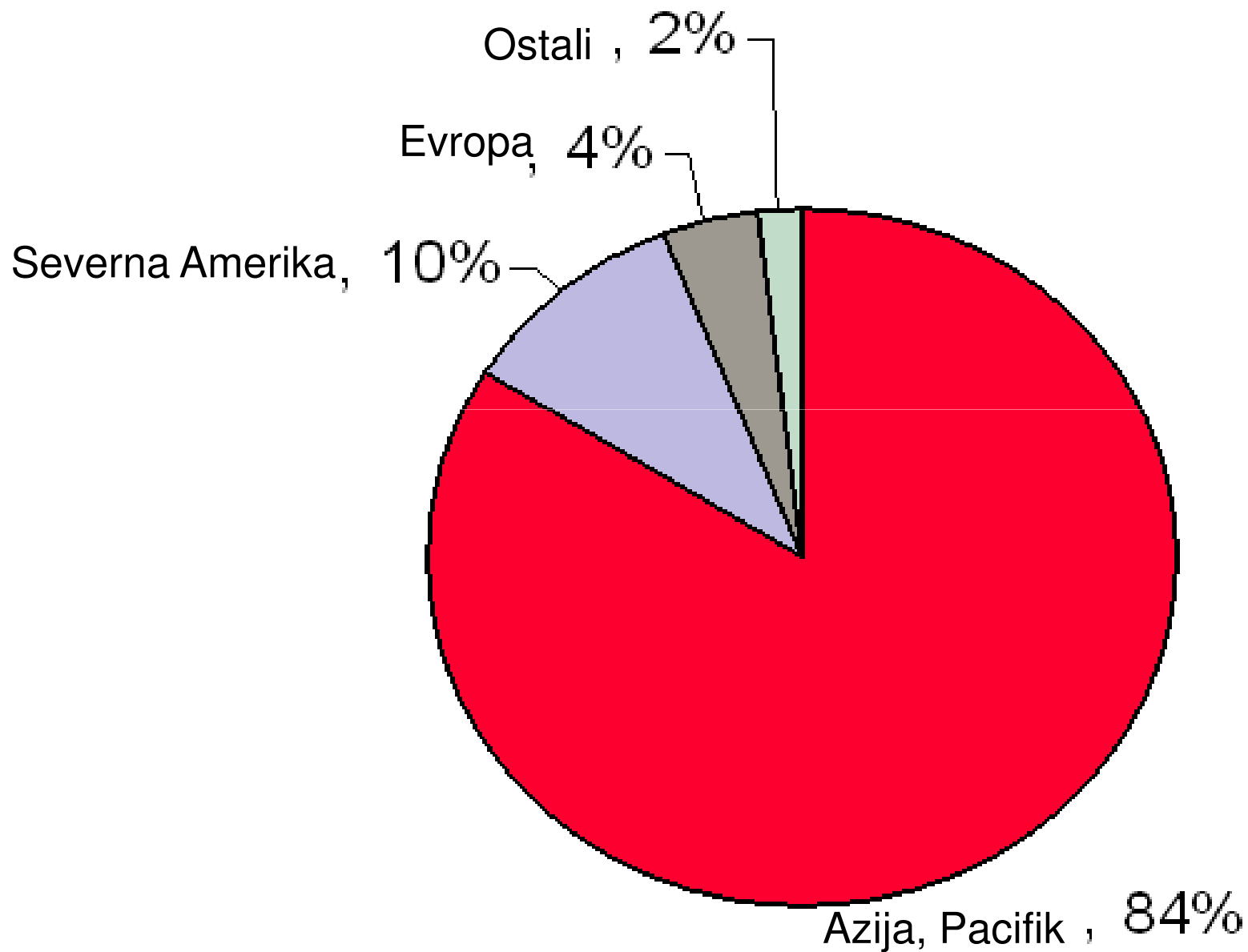
FTTCabFTTc FTTN



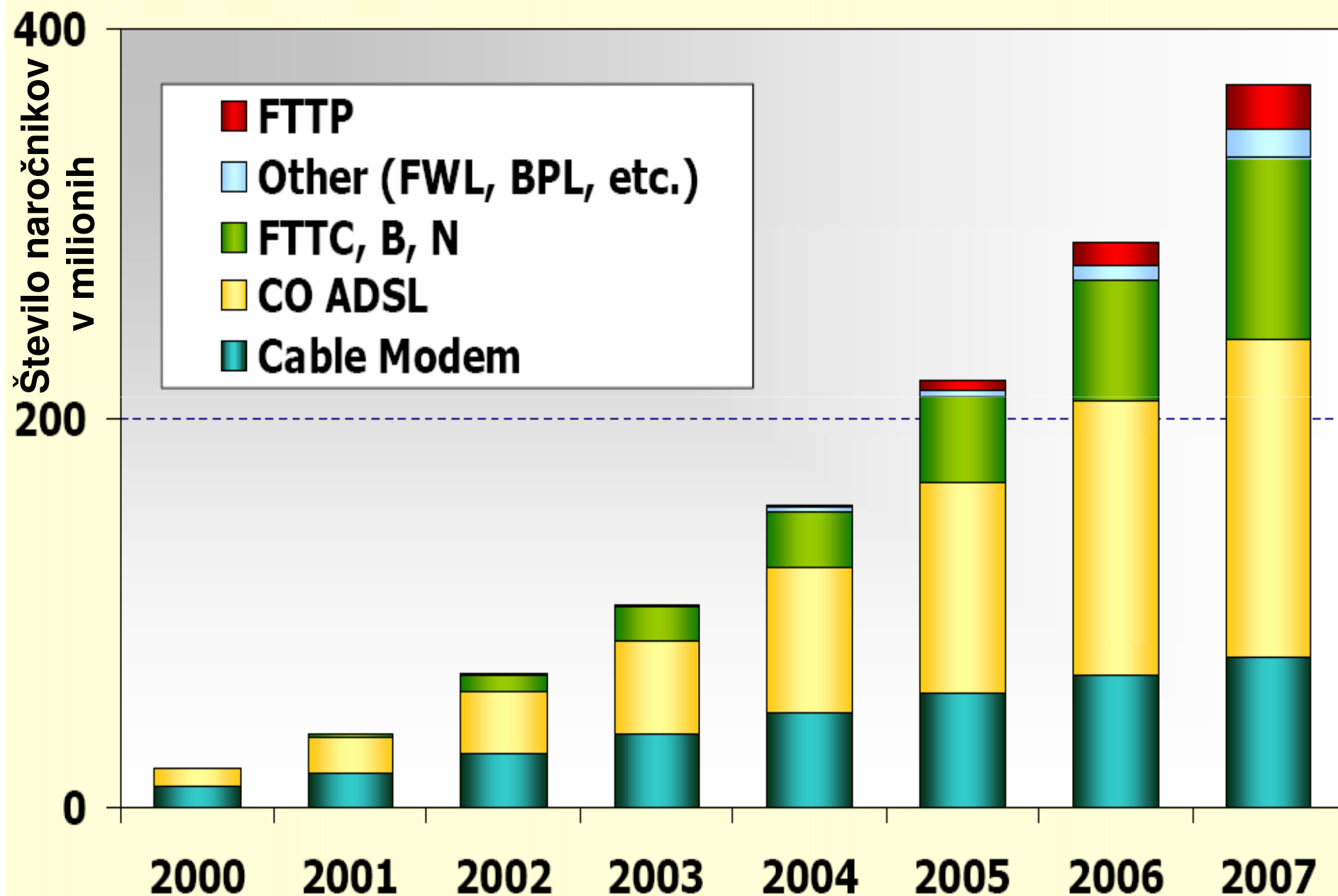
# Graditev hišnih priključkov po področjih



# FTTP naročniki po regijah



# Graditev hišnih priključkov po tehnologijah



# Vrste multipleksiranja

- **TDM PON**

Naročniku pripada lastno časovno okno v nizu časovno razvrščenih bitov. V praksi.

- **WDM PON**

Naročniku pripada lastna  $\lambda$ , razpolaga s celotnim spektrom WDM kanala. V praksi.

- **SCM PON**

Naročniku pripada spekter določenega radijskega podnosilnika(ov). V praksi.

- **CDM PON**

Naročniku pripada lastna koda. V razvoju (spread spectrum).

- **OFDM(A) PON**

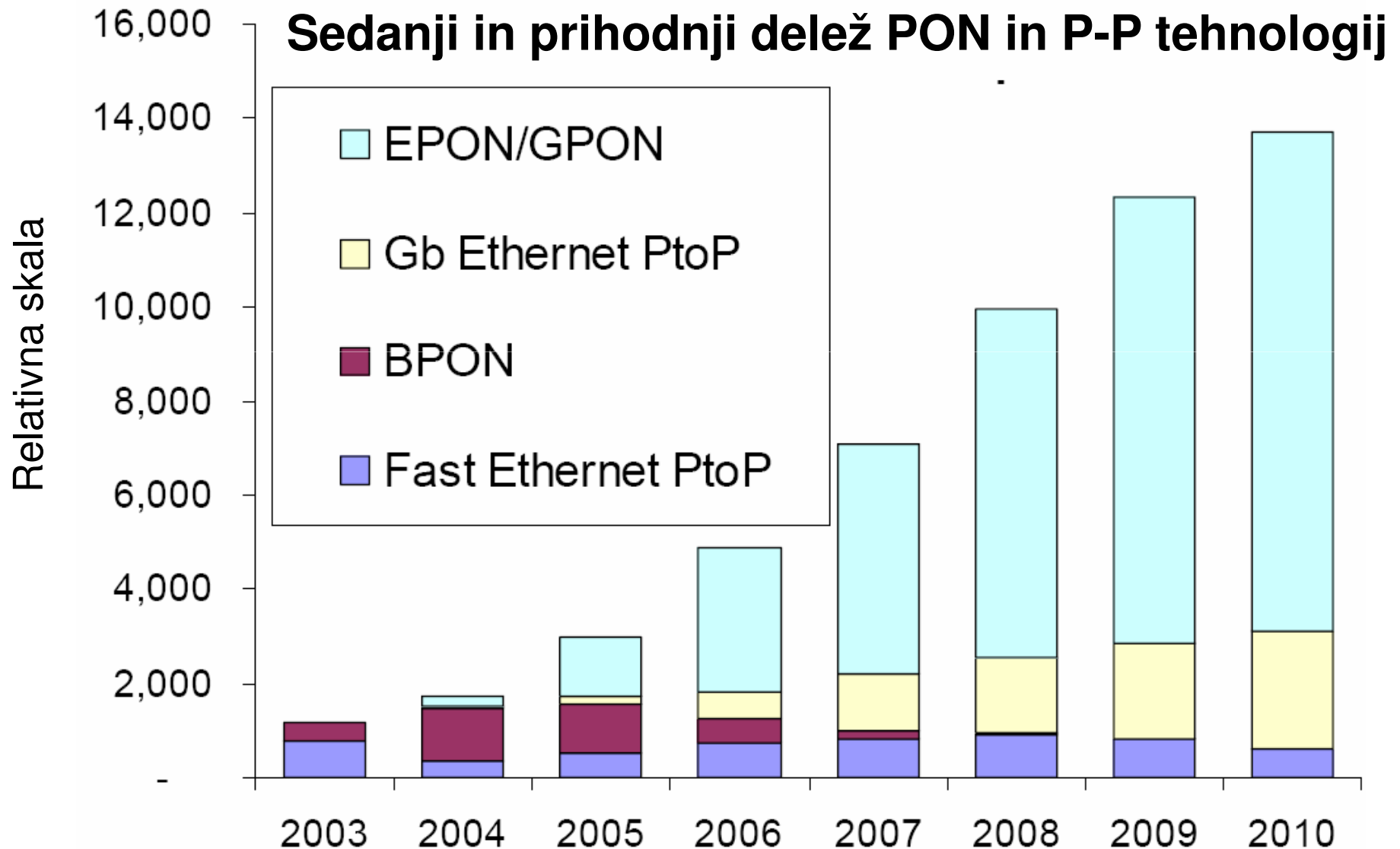
Naročniku pripada spekter določenega optičnega podnosilnika(ov). V preizkušanju.

- **CO-PON**

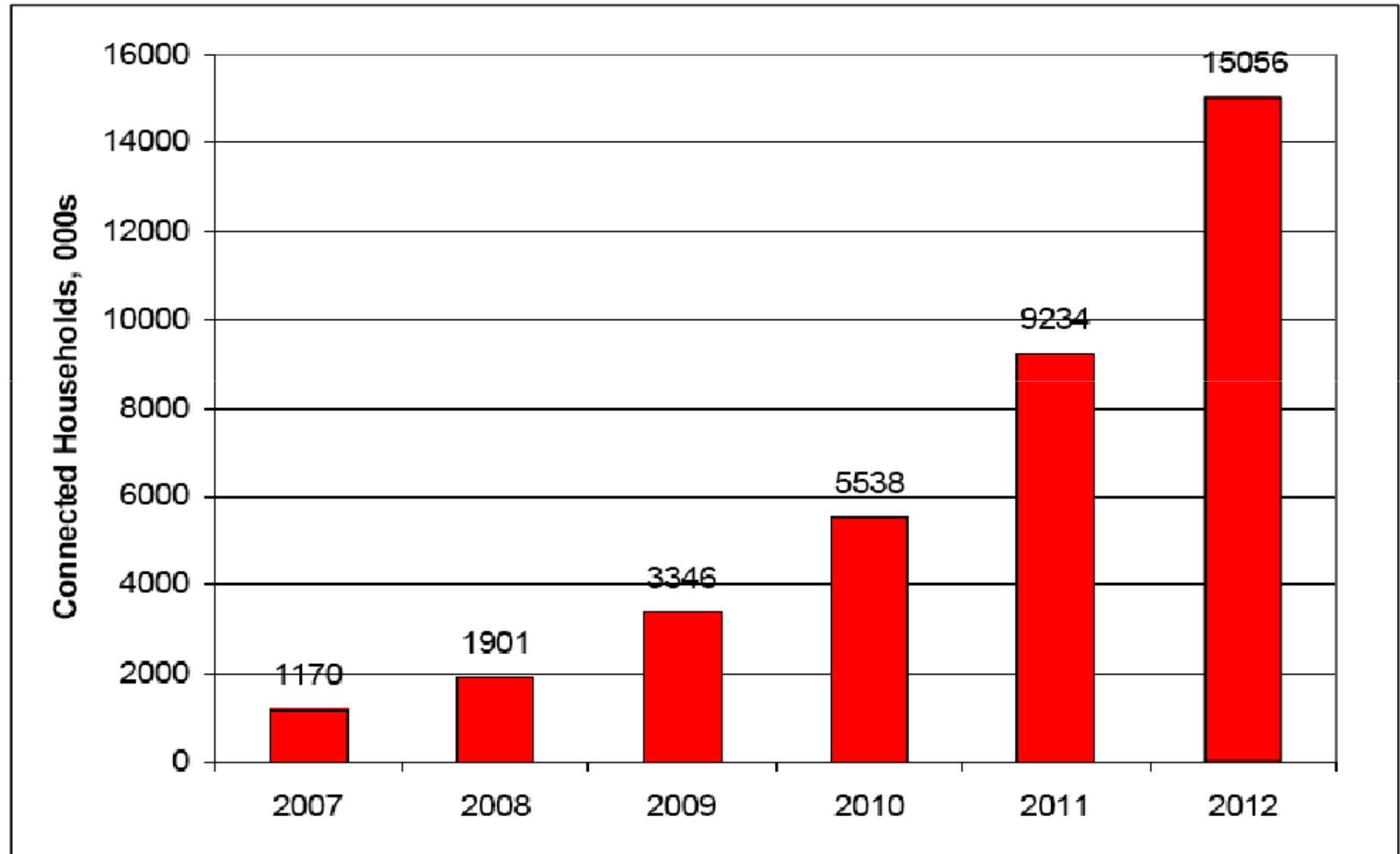
Koherentni sprejem. V razvoju.



# Razvoj EPON in GPON



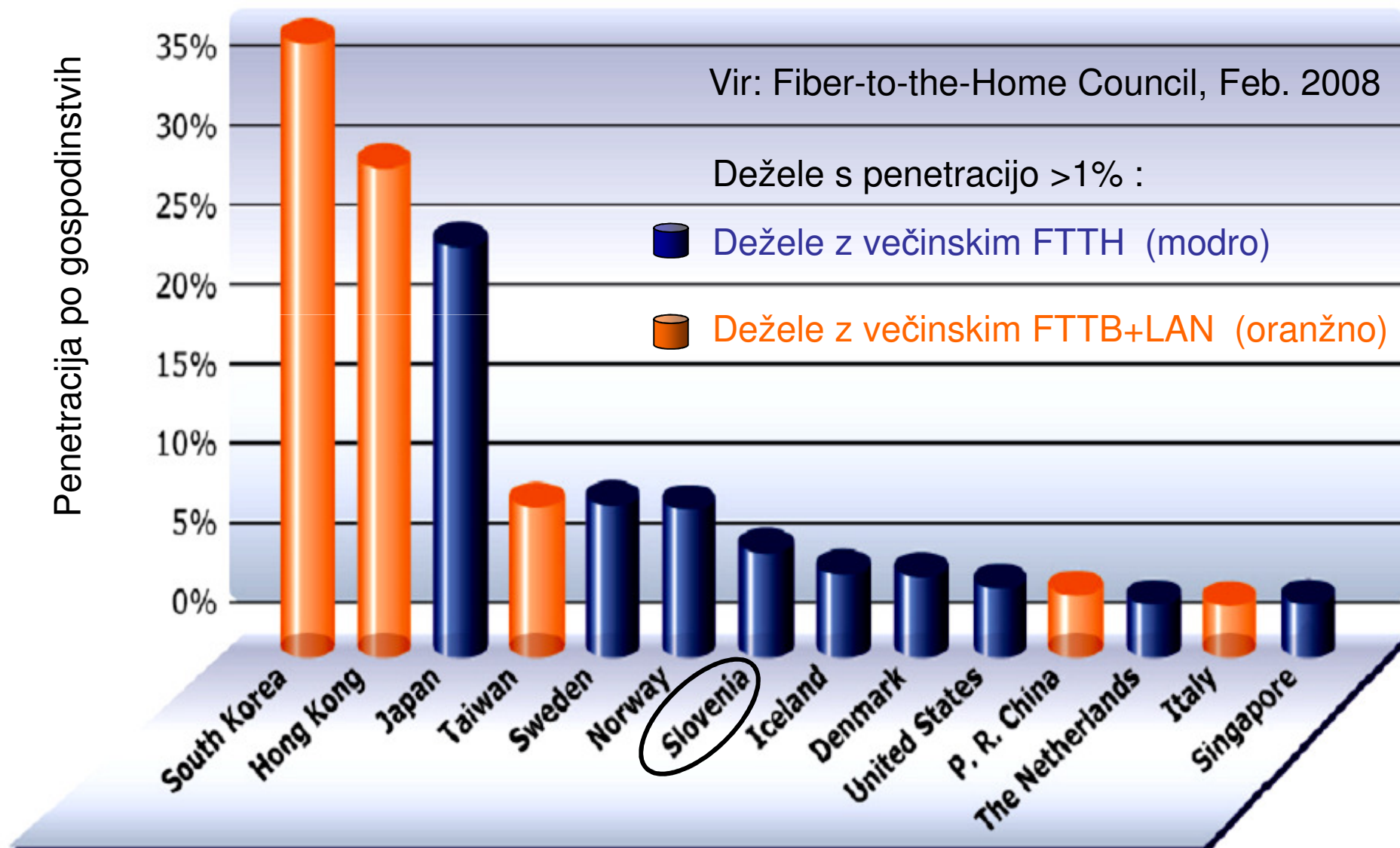
# FTTH/B Evropa – naslednjih 5 let



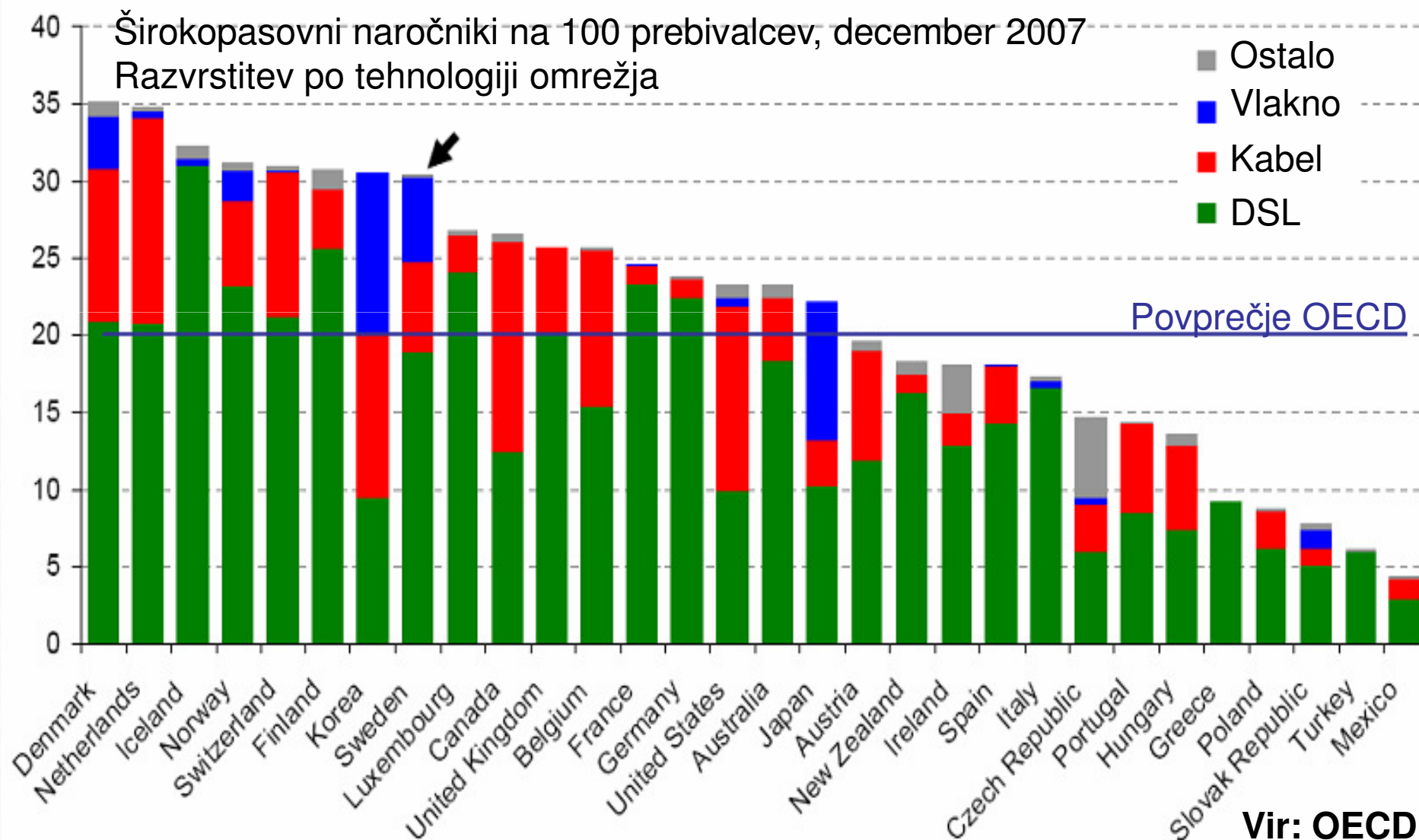
23.06.2008

Source: FTTH-Council Europe/Heavy Reading, 2008

# Dežele z največjo penetracijo FTTP (FTTH/FTTB+LAN), Slovenija med njimi!



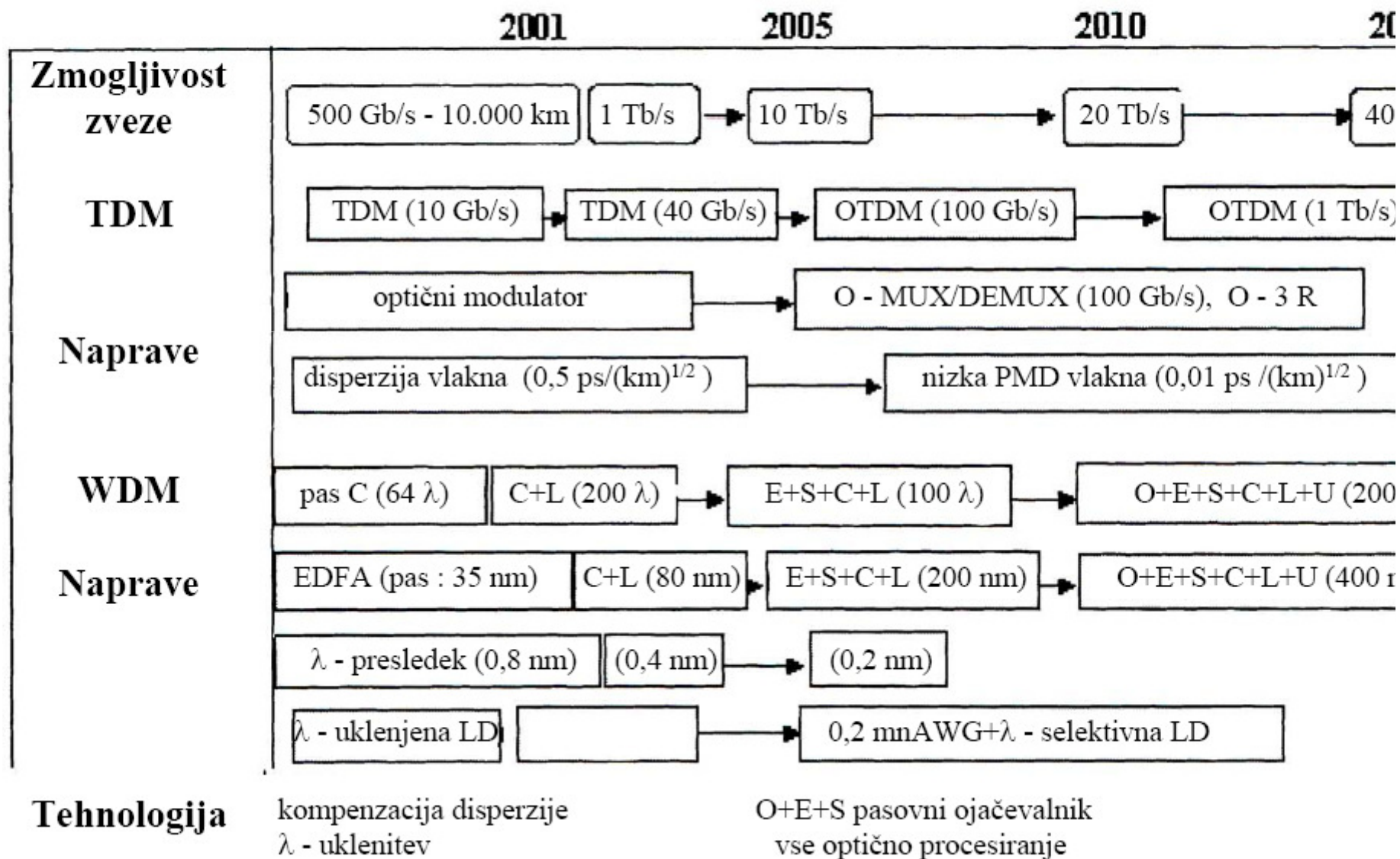
# Pregled razširjenosti tehnologij po razvitih državah



Vir: OECD



## 5.18 OPTIČNE KOMUNIKACIJE - napoved 2001 - 2015

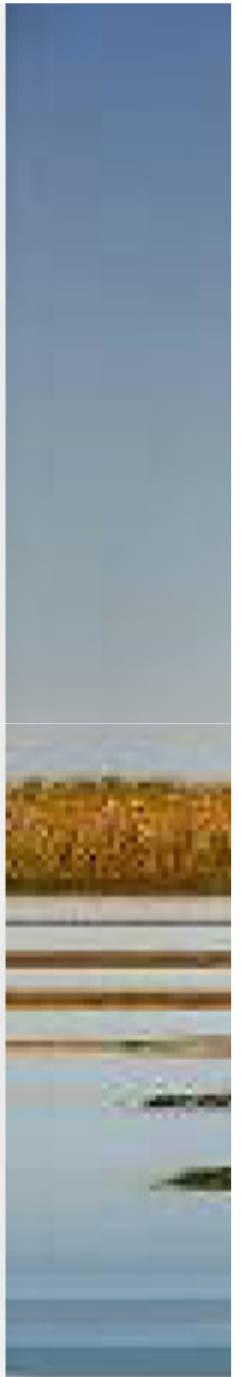


# SKLEP: Novi tehnološki trendi v hrbteničnem in mestnem omrežju

- Digitalni modulatorijski formati
- DWDM multipleksiranje
- OFDM
- Koherentni sprejem
- PoIMux in MIMO?

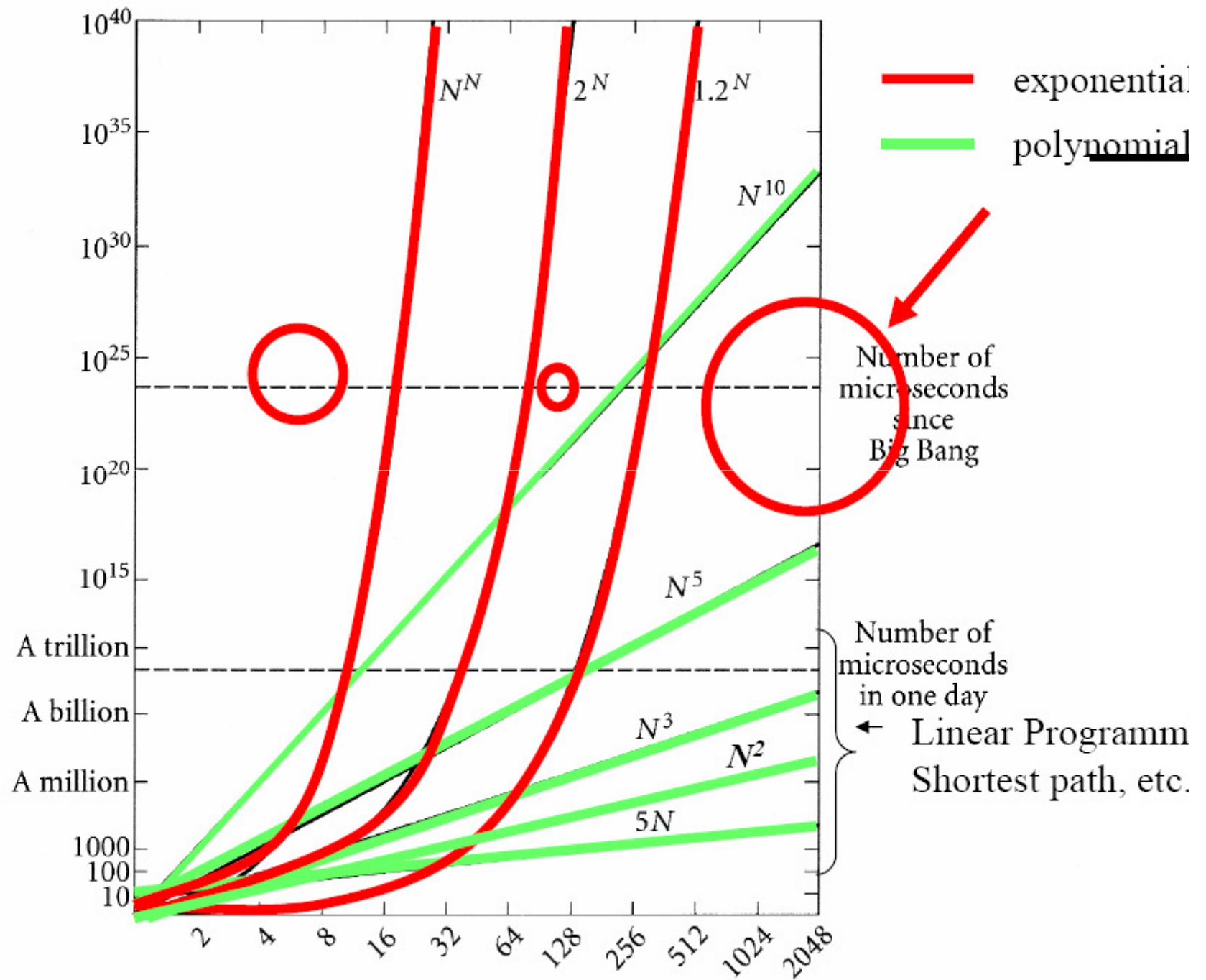
# SKLEP: Novi tehnološki trendi v dostopovnem omrežju

- WDM PON
- WDM/TDM PON
- LR/MS WDM/TDM PON
- OFDM(A) PON
- Koherentni PON

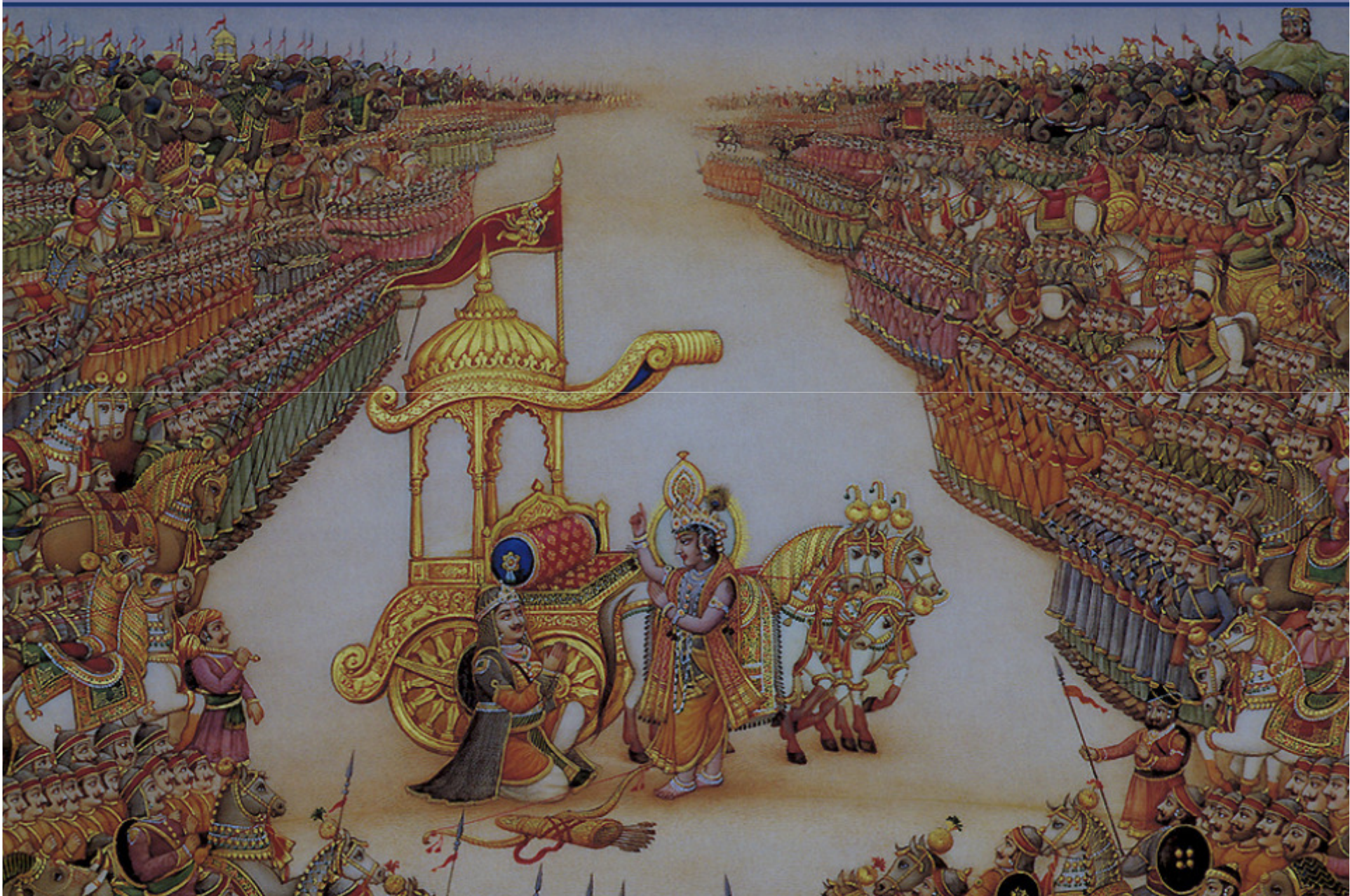




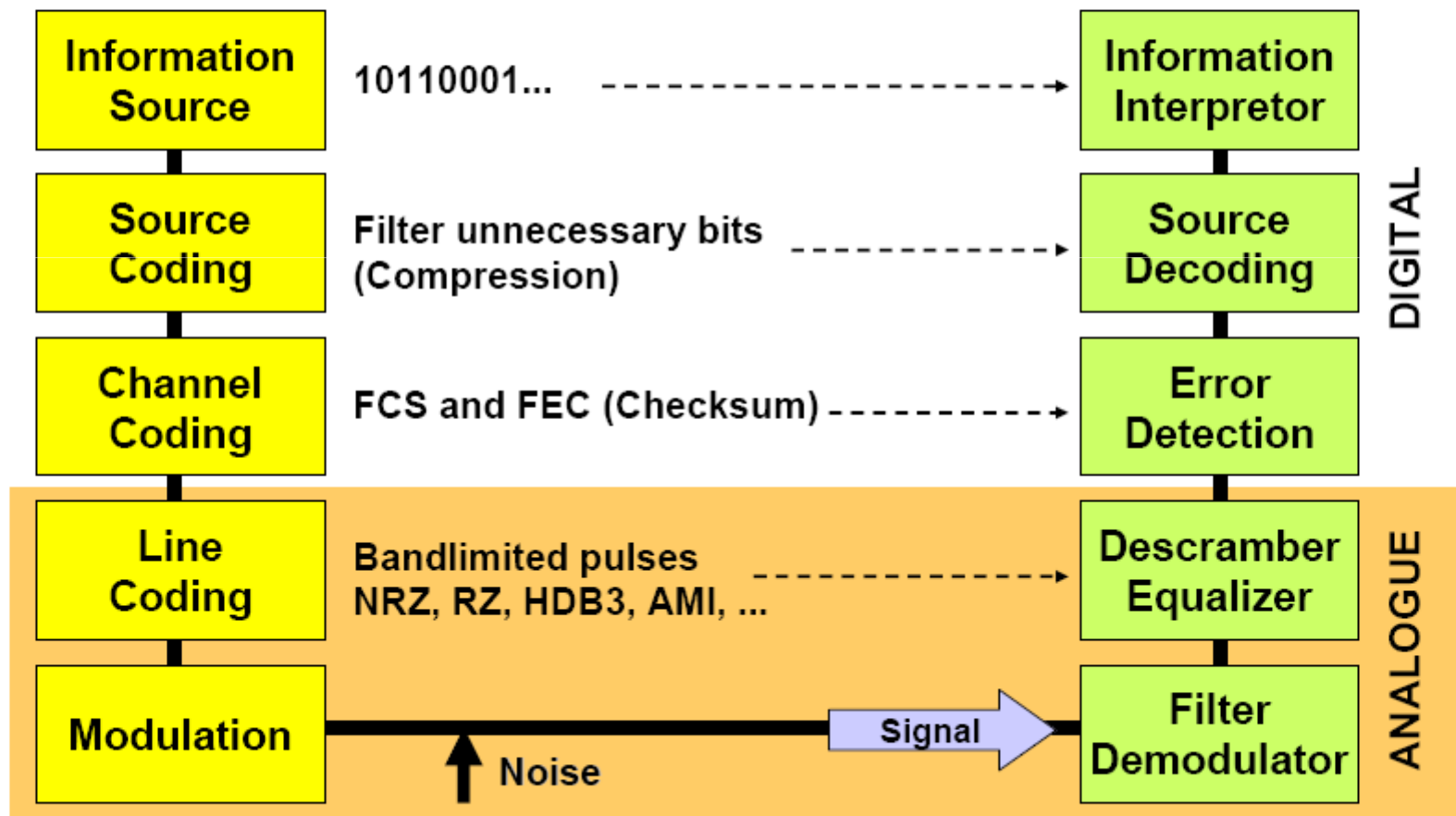
1 2000)







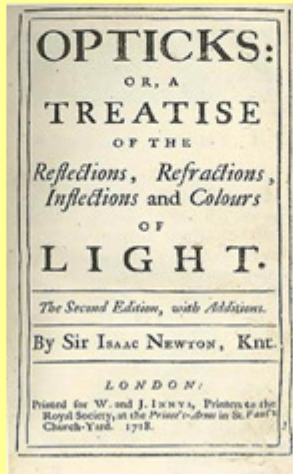
# Transmission System





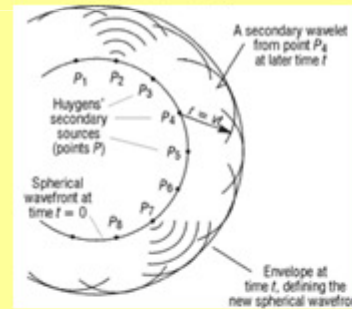
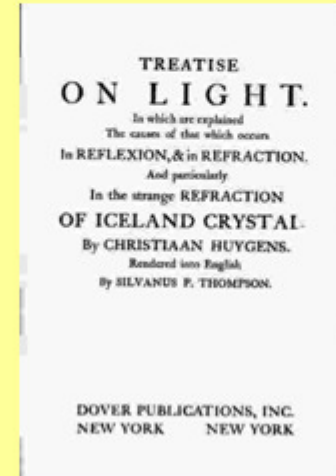
# Historical debate on nature of light

## Particles



or

## Waves



## Light = EM waves



$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} = -\frac{d}{dt} \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

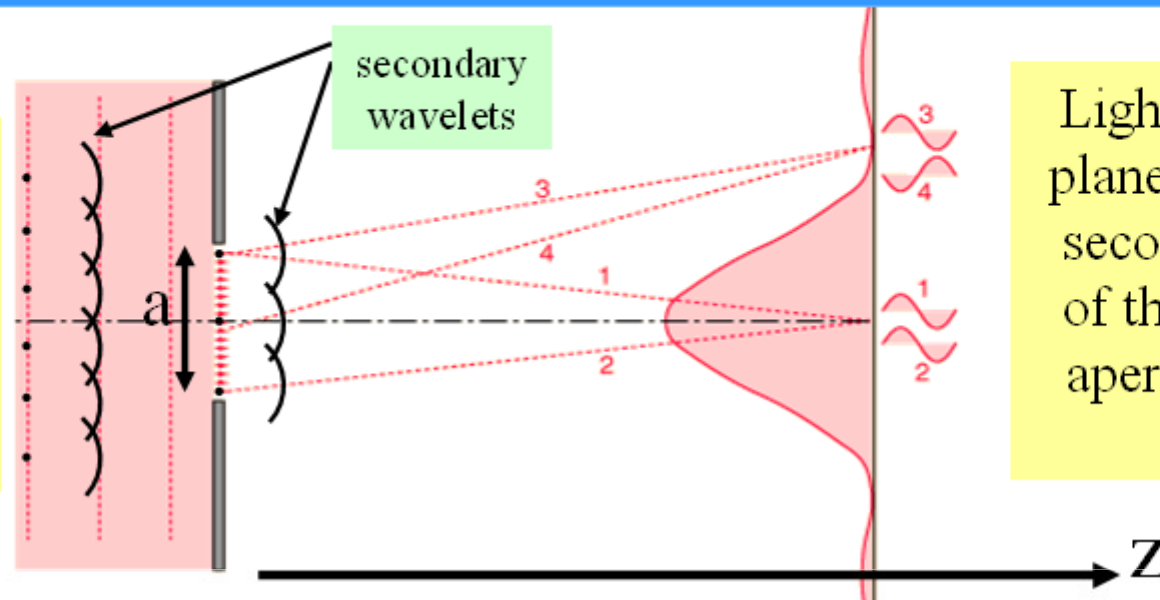
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \mu_0 (I + I_d)$$

$$\oiint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = Q/\epsilon_0$$

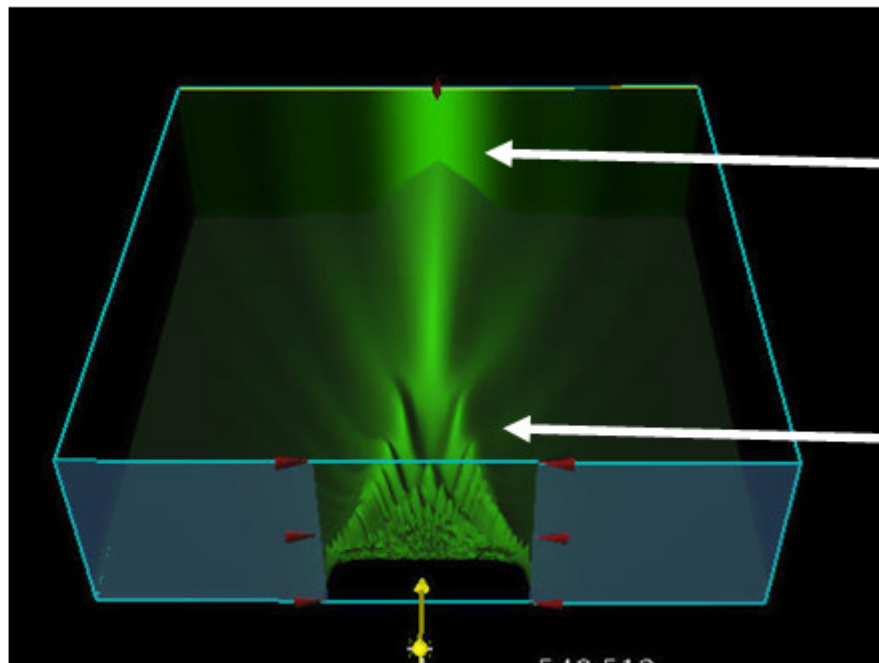
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

## B. Wave-Optics : Single-slit Diffraction

Aperture (width  $a$ )  
causes light to  
spread  
(diffraction)



Light pattern at a  
plane  $z$  is the sum  
of the unobstructed  
aperture (including  
phases)



Far-field ( $z \gg a^2/\lambda$ ) =  
Fraunhofer diffraction  
(simpler mathematical form  
= Fourier Transform)

Near-field ( $z < a^2/\lambda$ ) =  
Fresnel diffraction  
(complex mathematical form)