

Reti di Calcolatori

Lezione 2

Corso B

Stefano Forti

Dipartimento di Informatica

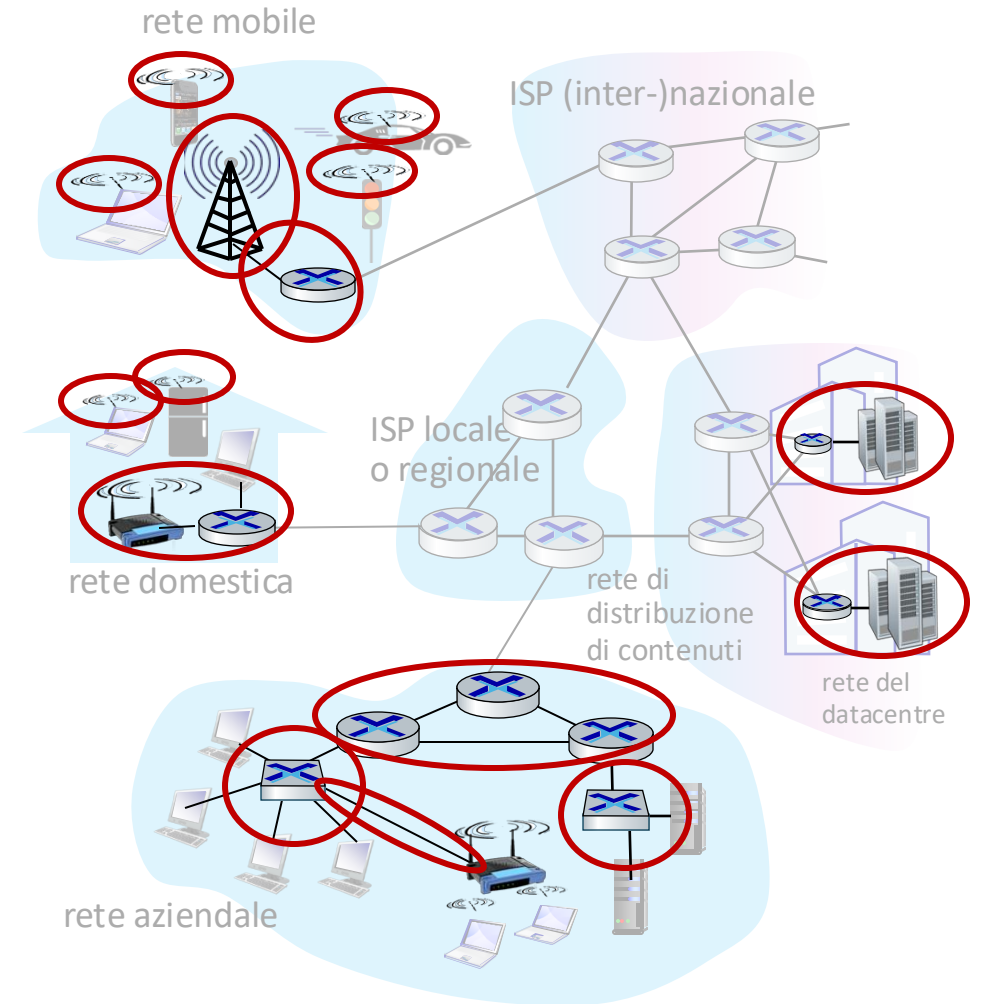
Università di Pisa

Ai confini della Rete

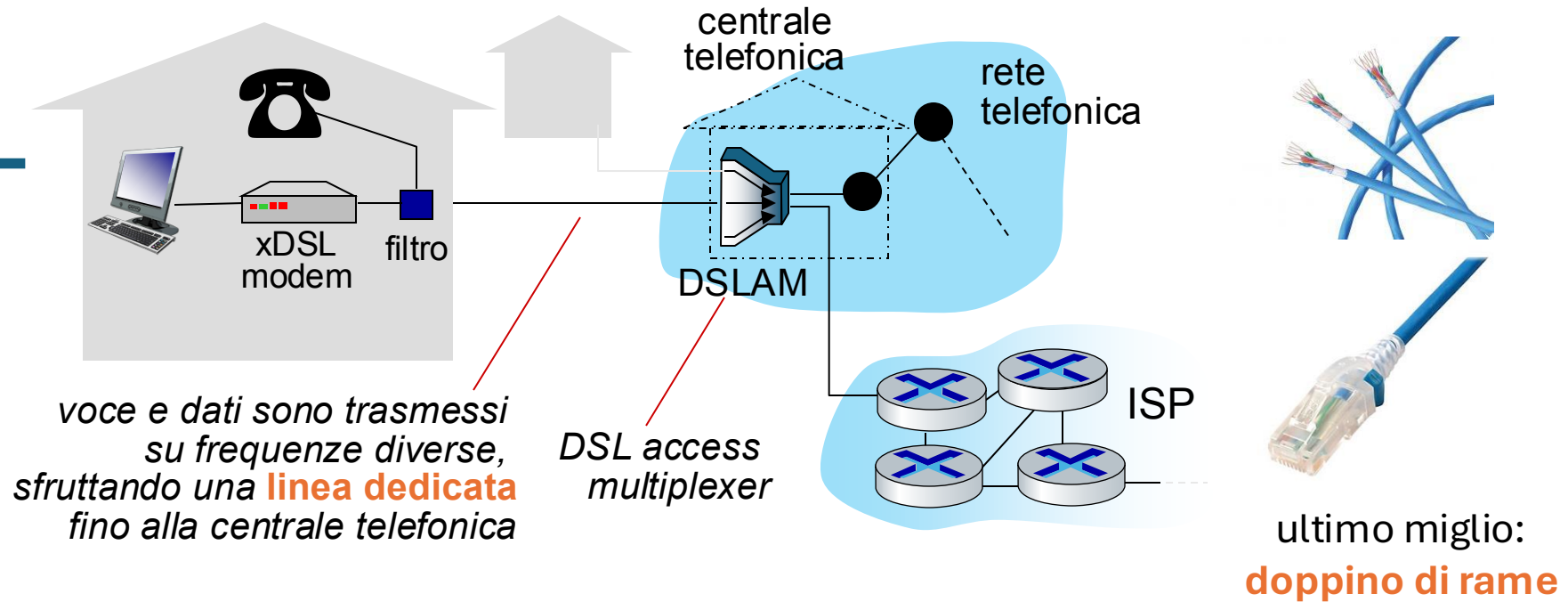
- Reti di accesso
- Accesso residenziale
- Accesso aziendale
- Accesso mobile e satellitare

Reti di accesso

- Le reti di accesso connettono fisicamente un sistema terminale al suo **edge router**
- Gli accessi sono di tipo
 - **residenziale** (xDSL, via cavo, FttH)
 - **aziendale** (Ethernet, WiFi)
 - **mobile** (4G/5G, satellitare)
- I mezzi di accesso possono essere **vincolati** (o cablati) oppure **non vincolati** (o senza fili)



Accesso DSL



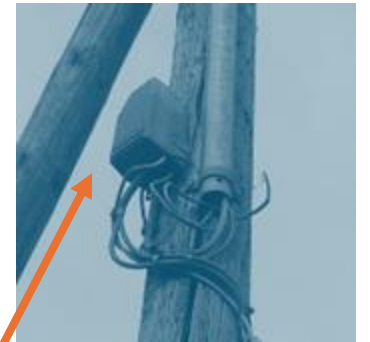
- La **compagnia telefonica** assume il ruolo di ISP
- La velocità degrada con la **distanza dalla centrale** telefonica (max ~10 km)
- Chiamate e connessione Internet condividono lo stesso collegamento
 - 0-4 kHz, **canale telefonico** ordinario a due vie
 - 4-50 kHz, **upstream** a velocità media verso il DSLAM – 3,5-16 Mbps in media
 - 50-1000 kHz, **downstream** ad alta velocità – 24-52 Mbps in media
- 1 doppino di rame = 1 utenza

Velocità e distanza massima xDSL

- In **fibra ottica** le connessioni tra DSLAM e ISP
- Il DSLAM può essere «avvicinato agli utenti» per migliorare il servizio
 - *Fibre to the Cabinet* (**FttC**) con gli standard VDSL e VDSL2



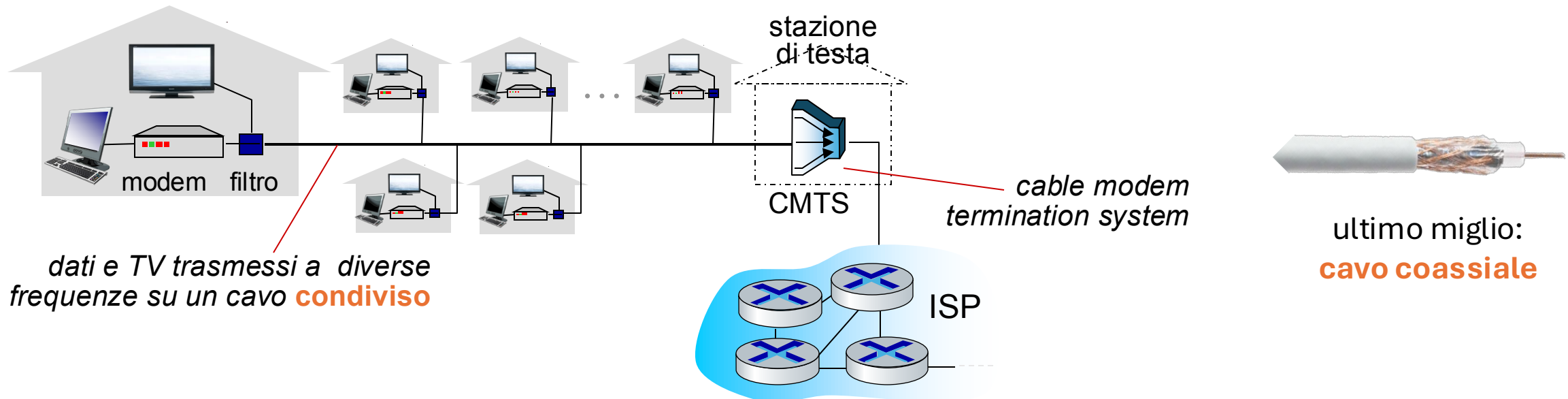
		Down Speed	Up Speed	Distance
Asymmetric	G.lite	1.5 Mbps	512 Kbps	18,000 ft
	ADSL	6-8 Mbps	640 Kbps	12,000-18,000 ft
	ADSL2	12 Mbps	1 Mbps	6,000 ft
	ADSL2+	27 Mbps	1 Mbps	3,000 ft
	VDSL	13-52 Mbps	1.5-2.3 Mbps	4,500 ft
Both	VDSL2	200 Mbps	200 Mbps	6,600 ft
Symmetric	IDSL	144 Kbps	144 Kbps	More than 2,000 ft
	SDSL	1.5 Mbps	1.5 Mbps	10,000-18,000 ft
	HDSL	2.3 Mbps	2.3 Mbps	12,000 ft



- Standard **G.fast** (2014) fino a **1Gbps** su ~100 m
 - *Fibre to the Derivation Point* (**FttDP**), portando la fibra ottica fino alle «chiosstrine»

Accesso via cavo

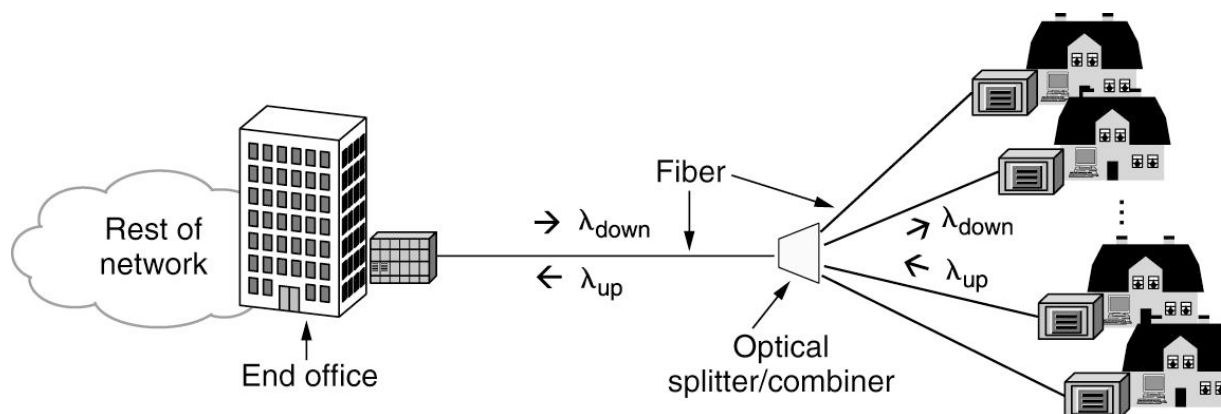
- Utilizza le infrastrutture esistenti della **TV via cavo**
- Cavi in fibra ottica collegano il CMTS ai router ISP (*hybrid fiber-coax, HFC*)
 - una **giunzione di quartiere** serve da 500 a 5000 abitazioni
 - 40Mbps-1,2Gbps downstream; 30-100 Mbps upstream (standard DOCSIS 2.0 e 3.0)
- La velocità degrada con la **distanza** e o a causa della **congestione** dovuta all'utilizzo di **canale condiviso** tra più abitazioni



Fibre to the Home (FttH)



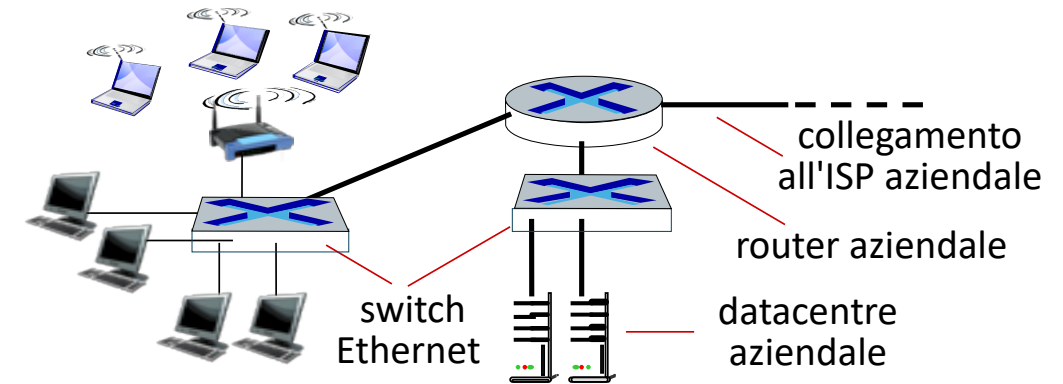
- Porta la **fibra ottica** dalla centrale telefonica fino dentro le abitazioni
 - fino a 1 Gbps per fibra
- Nelle reti ottiche passive (**PON**), il terminatore ottico di rete (**ONT**) nell'abitazione è connesso a uno **splitter** tramite una fibra dedicata
- Lo splitter combina più abitazioni (~100) e si collega tramite fibra ottica condivisa al terminatore ottico di linea (**OLT**) nella centrale telefonica
- L'OLT si connette al **router di bordo** dell'ISP e, tramite questo, a Internet



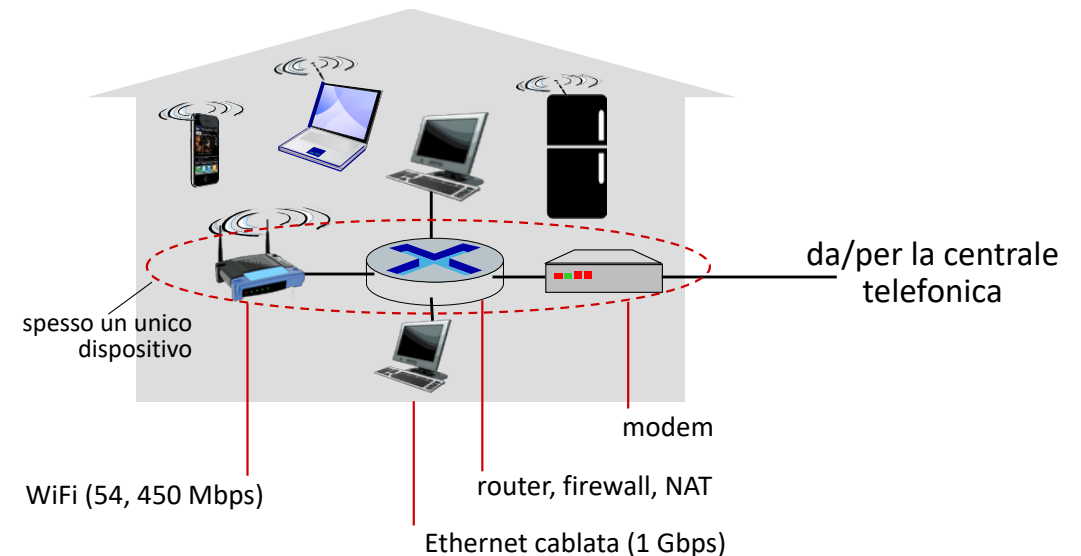
Accesso aziendale

- Nelle aziende e nelle università i sistemi periferici sono collegati al router di bordo attraverso una LAN

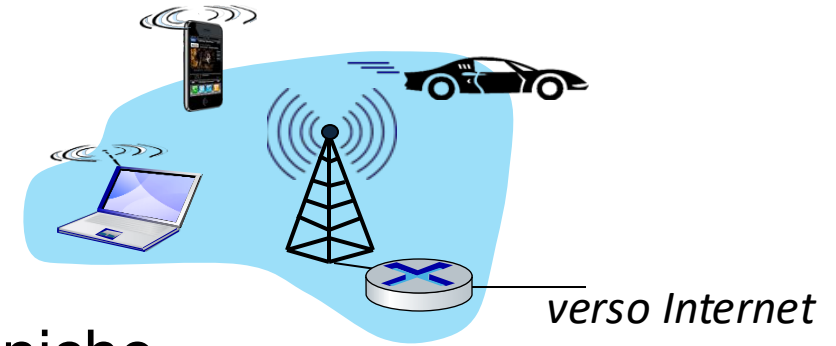
- Ethernet: 100 Mbps, 1 Gbps, 10 Gbps
- WiFi: 802.11b/g/n: 11, 54, 450 Mbps
- le diverse LAN aziendali possono essere «raccolte» in una MAN



- La tecnologia **WiFi** è sempre più usata anche per creare LAN di tipo domestico



Accesso mobile e satellitare



- L'**accesso mobile** è fornito dalle compagnie telefoniche
 - grande **investimento infrastrutturale** su quarta e quinta generazione (4G e 5G)
 - **velocità variabile** ~ 10 Mbps (3G), ~ 100 Mbps (4G), ~ 500 Mbps (5G)
 - perdita di segnale dovuta a **distanza**, **ostacoli** e **interferenze** con altre comunicazioni radio
- L'accesso satellitare collega **trasmettitori terrestri** a **satelliti** geostazionari (**GEO**, 35000 km) o a bassa quota (**LEO**, ~ 800 km)
 - **installazione rapida lato utente**, senza necessità di infrastruttura terrestre cablata
 - latenze più alte della fibra (~60 ms vs ~10 ms), bande minori (~ 100 Mbps), soffre il **maltempo**
 - esempio: Starlink di Elon Musk (tecnologia LEO)



PopQuiz!

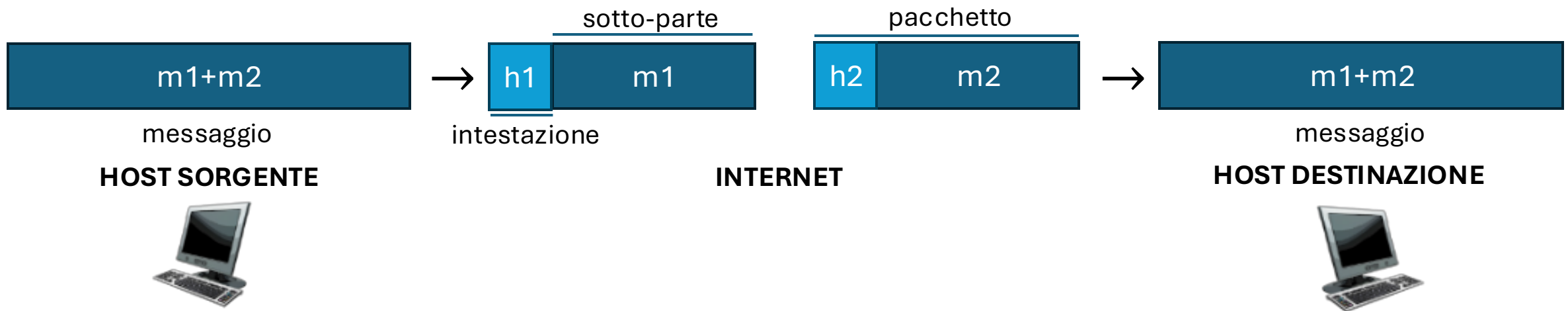
partici.fi/19385632

Il nucleo della Rete

- Commutazione di pacchetto
- Commutazione di circuito
- Struttura di Internet

I pacchetti

- Gli host dividono i messaggi da inviare in **sotto-parti** aggiungendo un'**intestazione** (*header*); ciascuna sotto-parte è detta **pacchetto**
- La sequenza di collegamenti e commutatori attraversata da un pacchetto dalla sorgente alla destinazione è detta **percorso**
 - ogni pacchetto può seguire un percorso diverso dagli altri

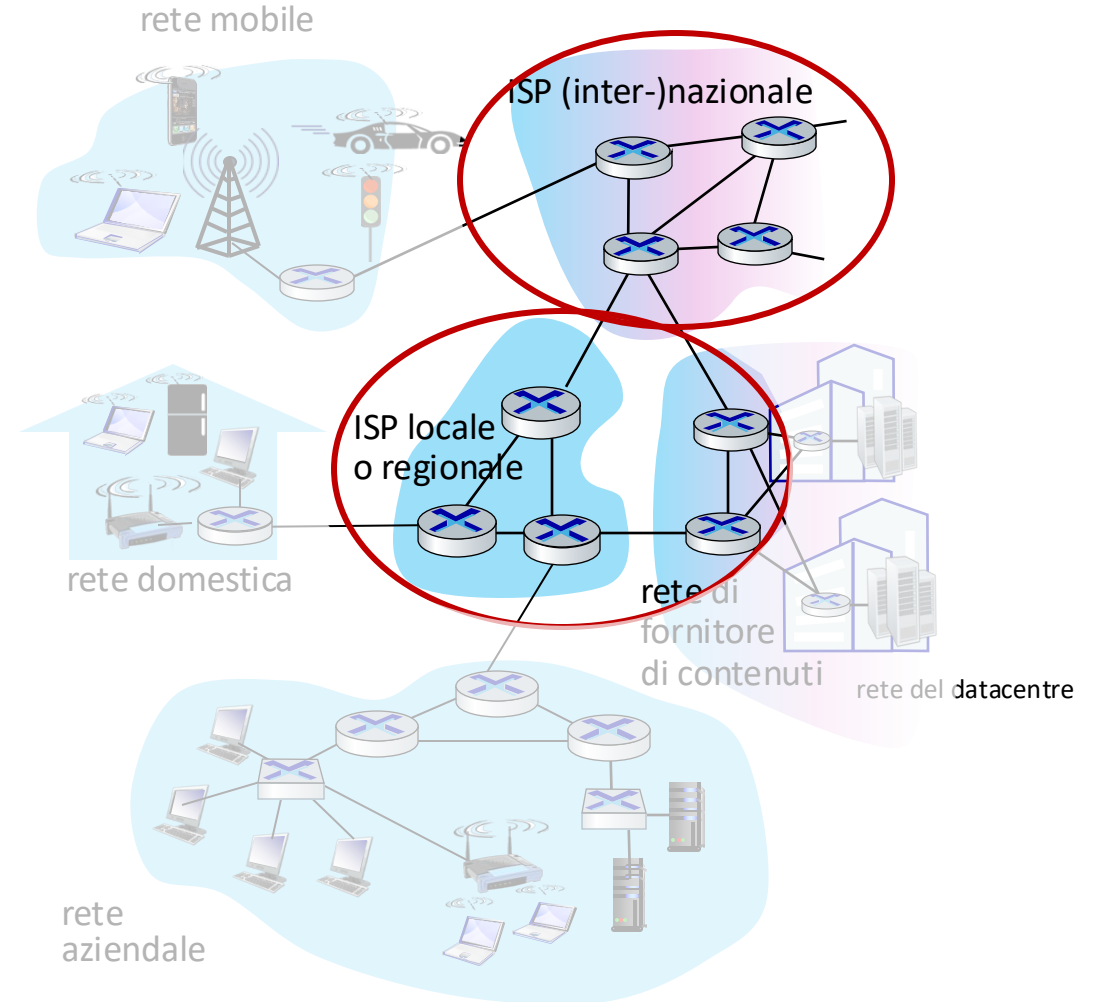


Un'analogia: trasporto merci

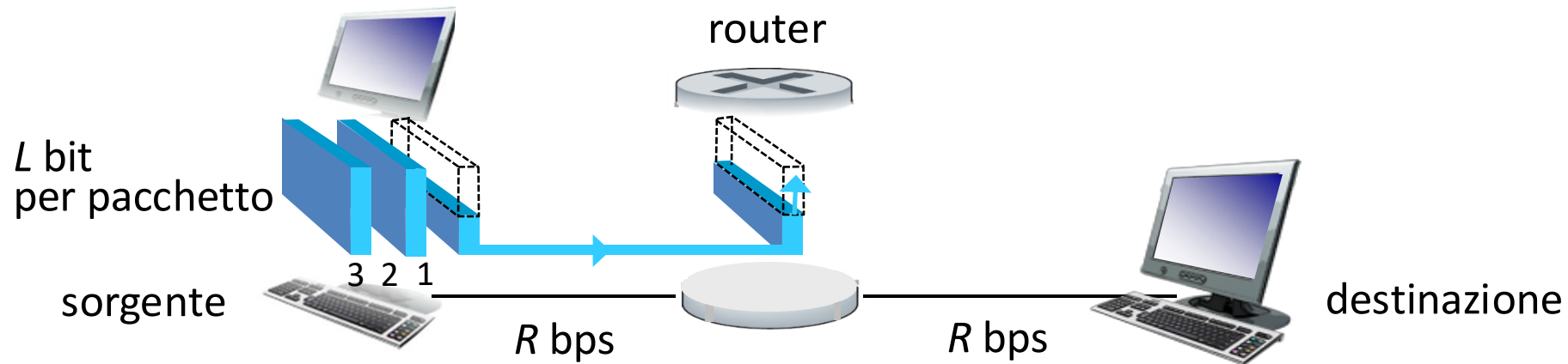


Commutazione di pacchetto

- I pacchetti viaggiano attraverso collegamenti, router e switch a una velocità pari alla velocità di trasmissione del collegamento
 - L bit su un canale con velocità R impiegano L/R secondi a percorrere il canale, senza considerare ritardi
- I commutatori di pacchetto usano la trasmissione **store & forward**
 - ricevono l'intero pacchetto prima di iniziare a trasmetterlo sul collegamento successivo



Trasmissione store & forward



- La sorgente deve inviare 3 pacchetti di L bit ciascuno
- Il router riceve il pacchetto 1 al tempo L/R e inizia l'inoltro
 - la destinazione riceve il primo pacchetto al tempo $2L/R$
- Il router riceve il pacchetto 2 al tempo $2L/R$ e inizia l'inoltro
 - la destinazione riceve il pacchetto 2 al tempo $3L/R$
- Il router riceve il pacchetto 3 al tempo $3L/R$ e inizia l'inoltro
 - la destinazione riceve il pacchetto 3 al tempo $4L/R$

Ritardo di trasmissione

- Il ritardo da un capo all'altro della comunicazione è detto appunto **ritardo end-to-end**
 - comprende più fattori: trasmissione, accodamento nei router, propagazione
- In prima approssimazione, un pacchetto di L bit che deve percorrere N collegamenti con velocità di trasmissione R tra host sorgente e destinazione subisce un **ritardo di trasmissione** pari a

$$d_{\text{trasm}} = N \frac{L}{R}$$

PopQuiz! – Ritardo di trasmissione

- https://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/interactive/one-hop-delay.php

Teamwork! – Ritardo di trasmissione di P pacchetti

Come è possibile generalizzare la formula per la trasmissione di P pacchetti di lunghezza L bit su N collegamenti con velocità R bps?

Teamwork! - Soluzione

Come è possibile generalizzare la formula per la trasmissione di P pacchetti di lunghezza L bit su N collegamenti con velocità R bps?

- Consideriamo la trasmissione di 4 pacchetti su 4 link:

L/R	2/LR	3L/R	4L/R	5/LR	6L/R	7L/R
sorgente			destinazione			
	sorgente			destinazione		
		sorgente			destinazione	
			sorgente			destinazione
(P-1) * L/R			N * L/R			

$$d_{\text{trasm}} = (N + P - 1) \frac{L}{R}$$

Ritardi di accodamento e perdita di pacchetti

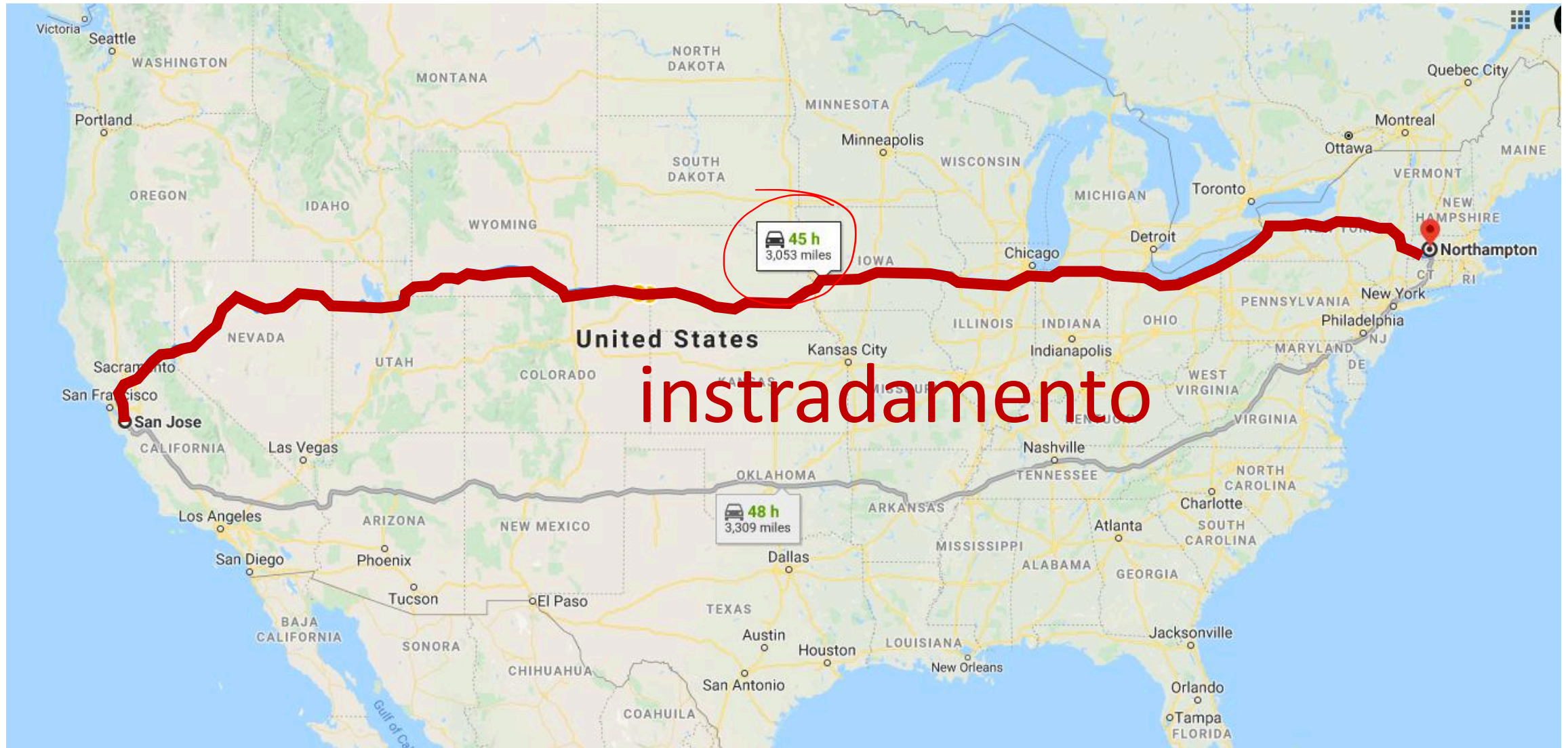
- Ogni commutatore connette più collegamenti
- Per ciascun collegamento, mantiene un **buffer di output** per conservare i pacchetti che sta per inviare su quel collegamento
- I pacchetti subiscono anche **ritardi di accodamento** nei buffer di output
- Se un pacchetto raggiunge un commutatore con il buffer di accodamento pieno per un certo collegamento, si verificherà una **perdita di pacchetti**
 - Il pacchetto appena arrivato o uno già in coda sarà scartato dal commutatore



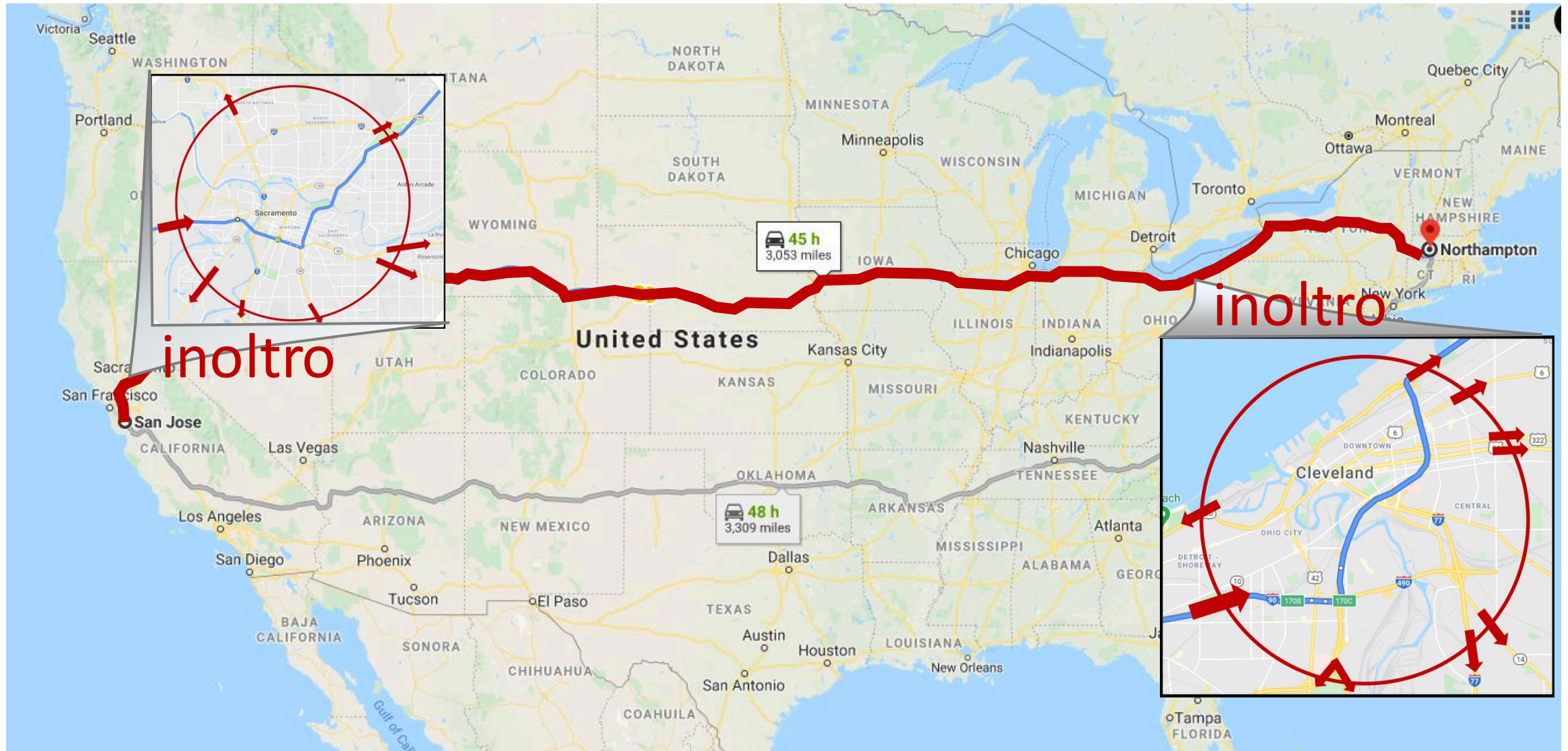
Tabelle di inoltro e protocolli di instradamento

- Ogni host in Internet ha un **indirizzo IP** utile per identificarlo
 - ogni pacchetto contiene nell'intestazione l'indirizzo IP dell'host destinatario
- Ogni router ha una **tabella di inoltro** (*forwarding*) che mette in relazione gli indirizzi di destinazione coi collegamenti in uscita
- Le tabelle di inoltro vengono impostate automaticamente dai **protocolli di instradamento** (*routing*) di Internet
- Ogni pacchetto è instradato singolarmente e indipendentemente dagli altri

Un'analogia: rotte e indicazioni

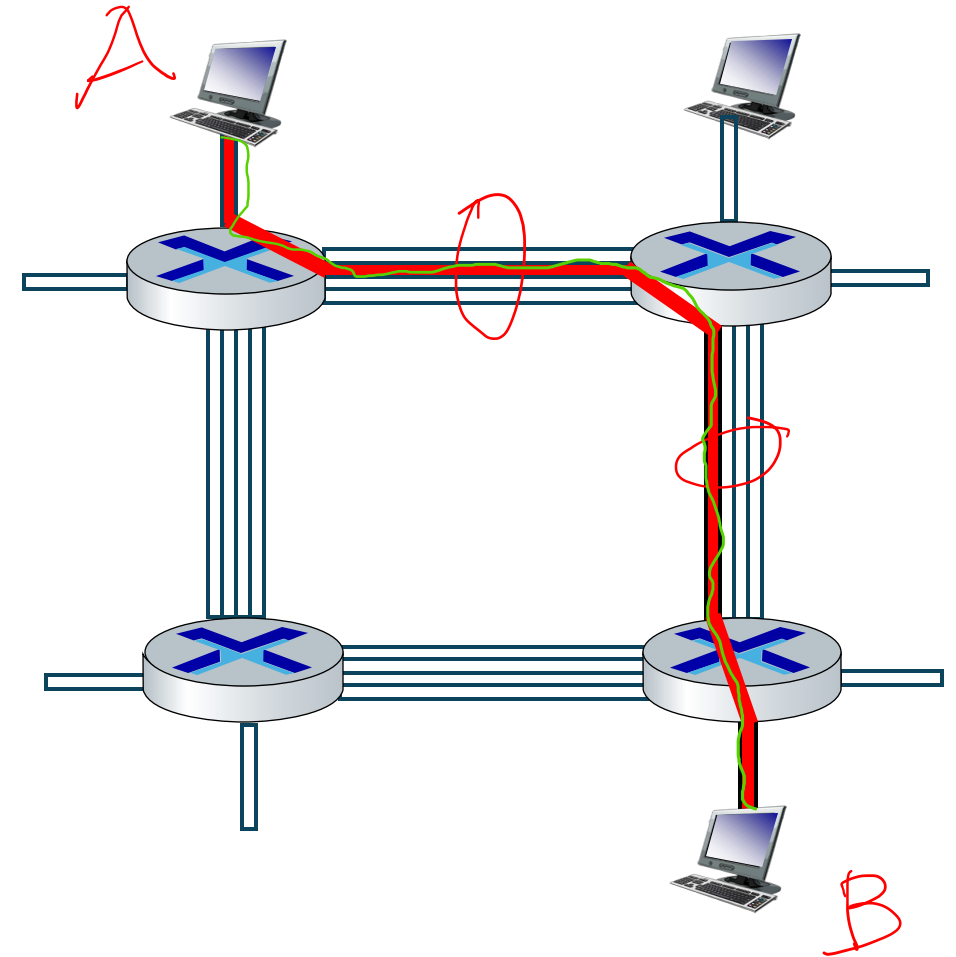


Un'analogia: rotte e indicazioni



Commutazione di circuito

- Nelle reti a **commutazione di circuito**, quando due host desiderano comunicare, la rete stabilisce una **connessione end-to-end dedicata**
 - velocità di trasmissione costante (**banda garantita**) pari a una frazione del canale
 - le reti telefoniche instaurano un circuito per ogni chiamata che viene effettuata
- La commutazione di circuito **non** prevede né ritardi né perdita di pacchetti
- Le risorse rimangono inutilizzate quando non c'è comunicazione

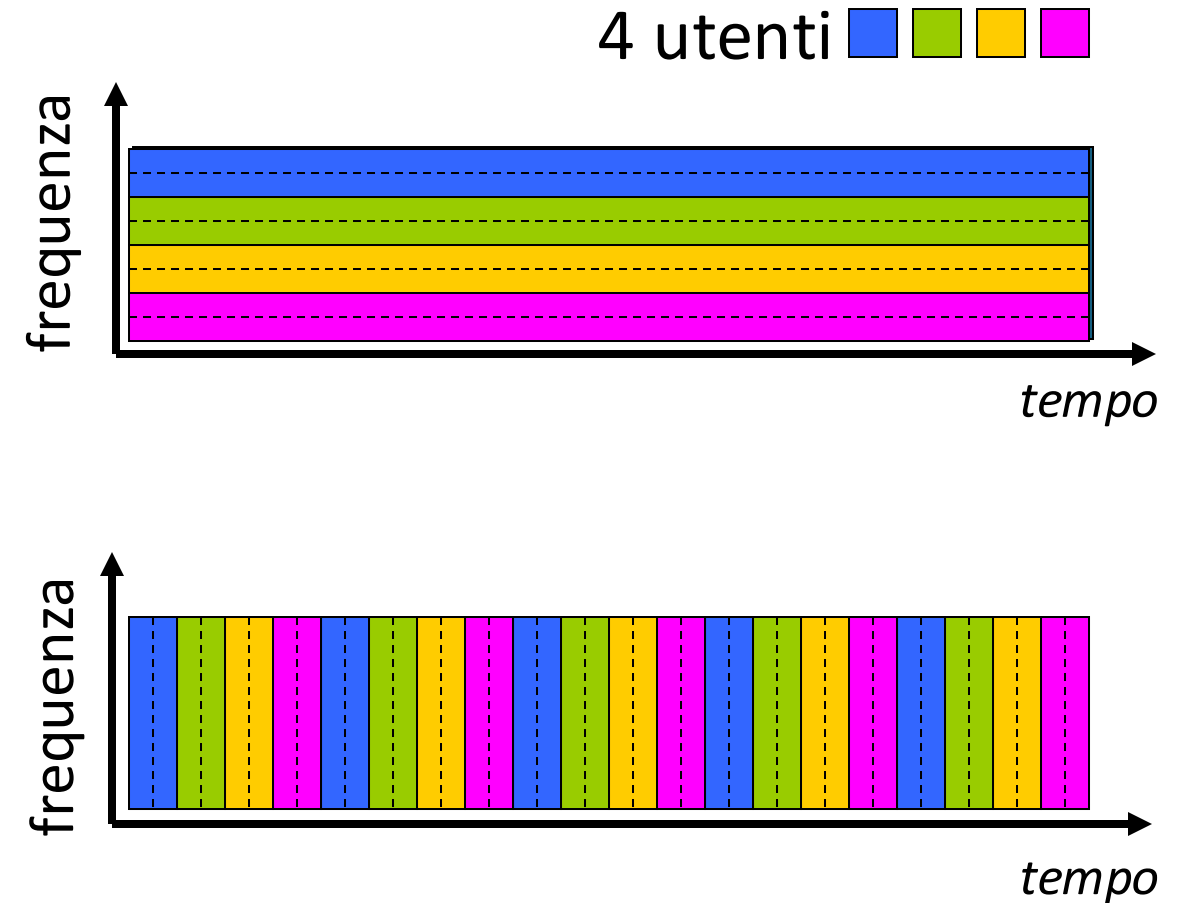


PopQuiz!

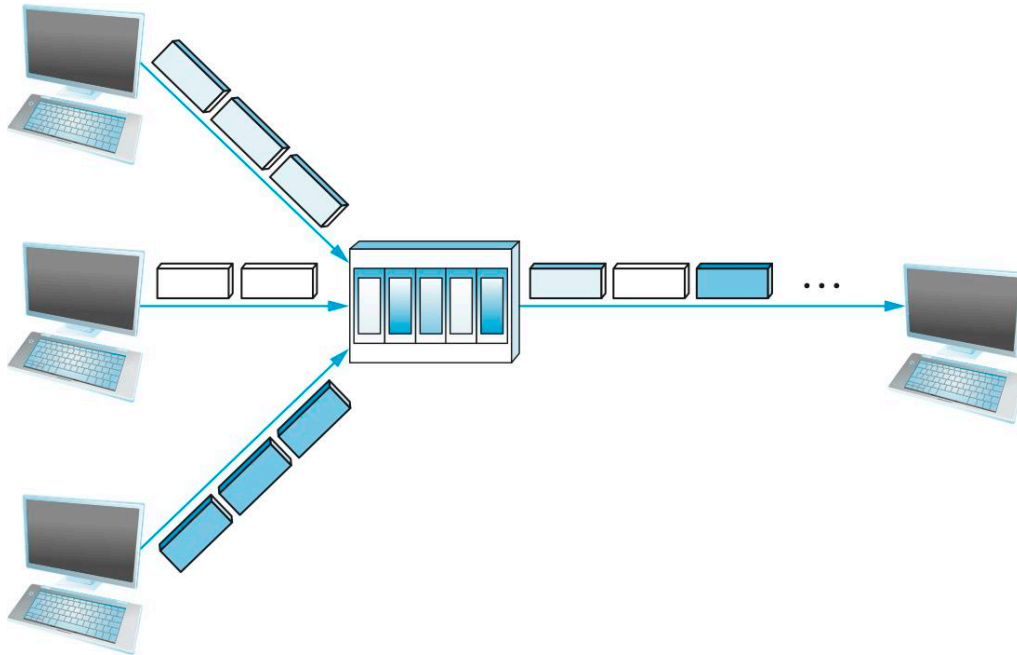
- https://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/interactive/circuit_switching.php

Multiplexing: frequenza e tempo

- Un circuito su di un collegamento viene implementato tramite
 - **frequency division multiplexing** (FDM) – il collegamento dedica una banda di frequenza per ciascuna connessione in corso (es. TV)
 - **time division multiplexing** (TDM) – il tempo viene suddiviso in frame di durata fissa, ripartiti in un certo numero di slot; ciascuno slot viene allocato dalla rete a una specifica connessione in corso (es. GSM)



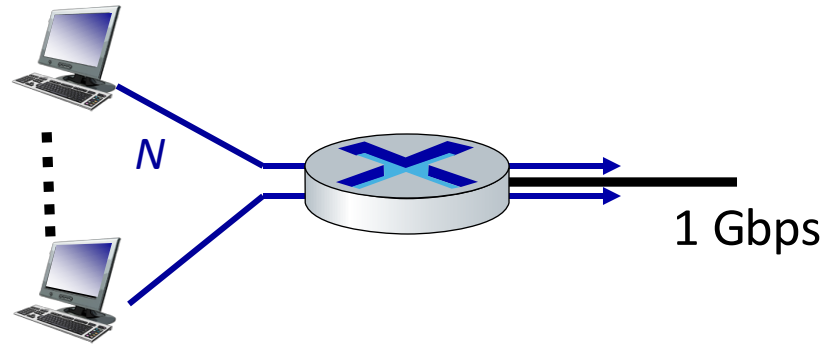
Multiplexing statistico



- Collegamento fisico condiviso nel tempo **come TDM, senza frame**
 - un nodo che deve inviare dati può farlo subito, senza attendere il suo turno
- Per garantire **equità** di trattamento
 - limite alla quantità di dati inviabile
 - decisione su quale pacchetto inviare, anche per garantire Qualità del Servizio
 - meccanismi di controllo della congestione
- E' l'approccio usato in **Internet**

PopQuiz! – Commutazioni a confronto

- collegamento da 1 Gb/s
- ciascun utente:
 - 100 Mb/s se “attivo”
 - attivo 10% del tempo



- Quanti utenti può supportare la rete sopra nel caso di comunicazione a circuito?
- Quanti nel caso di commutazione a pacchetto?

PopQuiz! – Soluzione

Commutazione di circuito

$$N = 1000 \text{ Mb/s} / 100 \text{ Mb/s} = 10 \text{ utenti}$$

Commutazione di pacchetto (processo di Bernoulli)

Supponiamo di avere $N = 50$ utenti. La probabilità che esattamente k si attivino insieme è

$$P(X = k) = \binom{N}{k} p^k (1 - p)^{N-k}$$

[Calcola
con](#)

[Wolfram Alpha!](#)

La probabilità che più di $X > 10$ utenti si attivino contemporaneamente è dunque

$$P(X > 10) = 1 - P(X \leq 10) = 1 - \sum_{k=0}^{10} P(X = k) = 1 - \sum_{k=0}^{10} \binom{N}{k} p^k (1 - p)^{N-k} = 1 - \sum_{k=0}^{10} \binom{50}{k} 0,1^k \cdot 0,9^{50-k}$$

Oppure, usiamo il limite del teorema centrale per stimare la seconda parte della sommatoria. [Se $Np \geq 5$ e $N(1 - p) \geq 5$] la seconda parte della sommatoria si può approssimare come una normale standard $\mathcal{N}(\mu, \sigma)$ con

$$\mu = Np = 0,1 \cdot 50 = 5$$

$$\sigma = \sqrt{N \cdot p \cdot (1 - p)} = \sqrt{50 \cdot 0,1 \cdot 0,9} = 2,12$$

Per $X = 10$ otteniamo lo z-score $z = \frac{10 - \mu}{\sigma} = \frac{10 - 5}{2,12} \simeq 2,36$. Dato che $P(X \leq 10) \simeq P(Z \leq 2,36)$, dalla [tabella della normale standard](#) otteniamo $P(X > 10) = 1 - P(X \leq 10) = 1 - P(Z < 2,36) = 1 - 0,9909 = 0,0091 = 0,91\%$

Confronto

Commutazione di pacchetto

- condivisione di risorse
- non necessita un setup
- miglior uso delle risorse e maggior numero di utenti
- può incorrere in congestione, necessita di protocolli ad hoc
- ritardi variabili nel percorso a causa di routing e code
- inoltrato non efficiente – decisione per ogni pacchetto

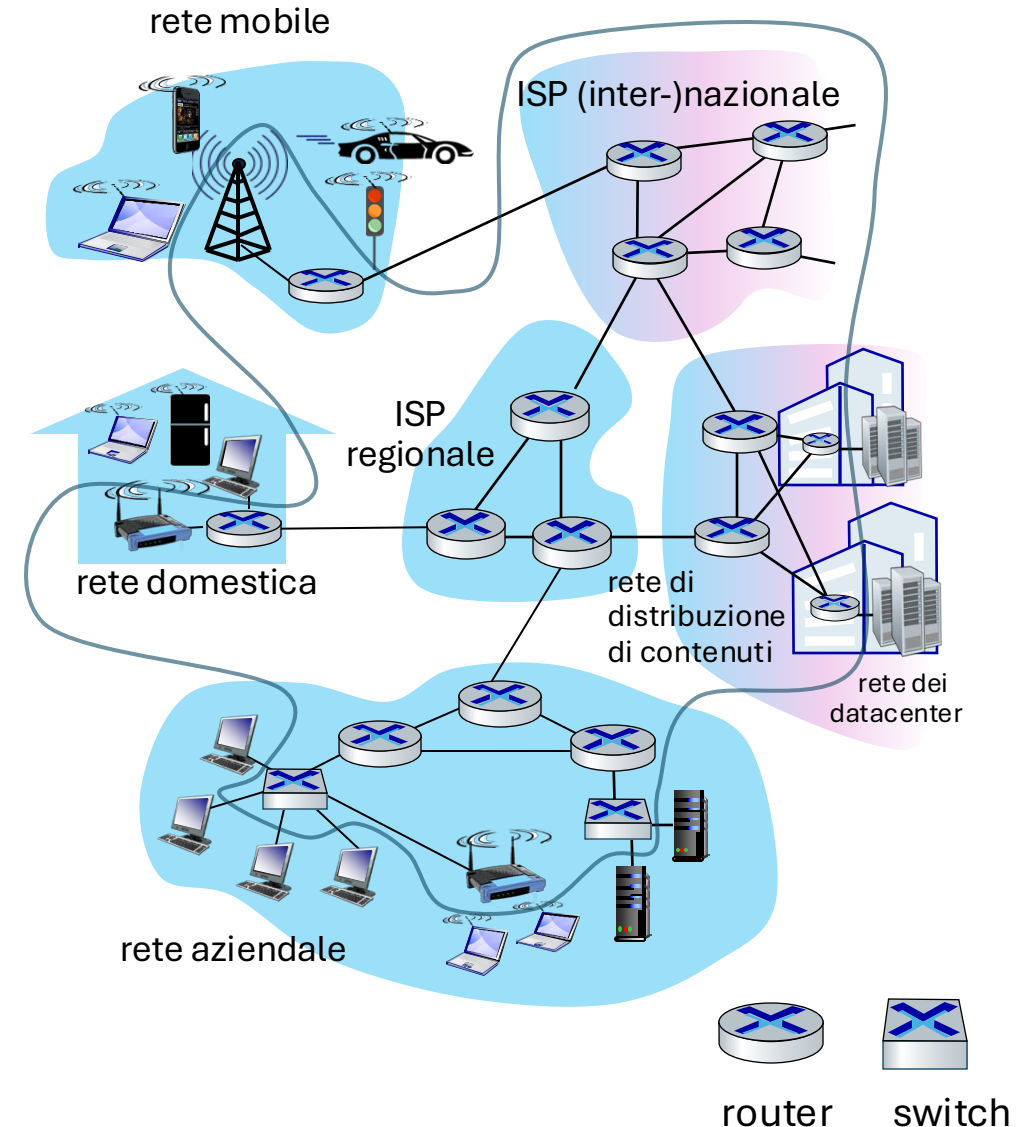
Commutazione di circuito

- risorse riservate
- setup necessario tramite segnalazione
- risorse inutilizzate nei periodi di silenzio
- performance garantita
- tecnologie di switching efficienti

Molte compagnie telefoniche stanno migrando anche il servizio telefonico verso la commutazione di pacchetto

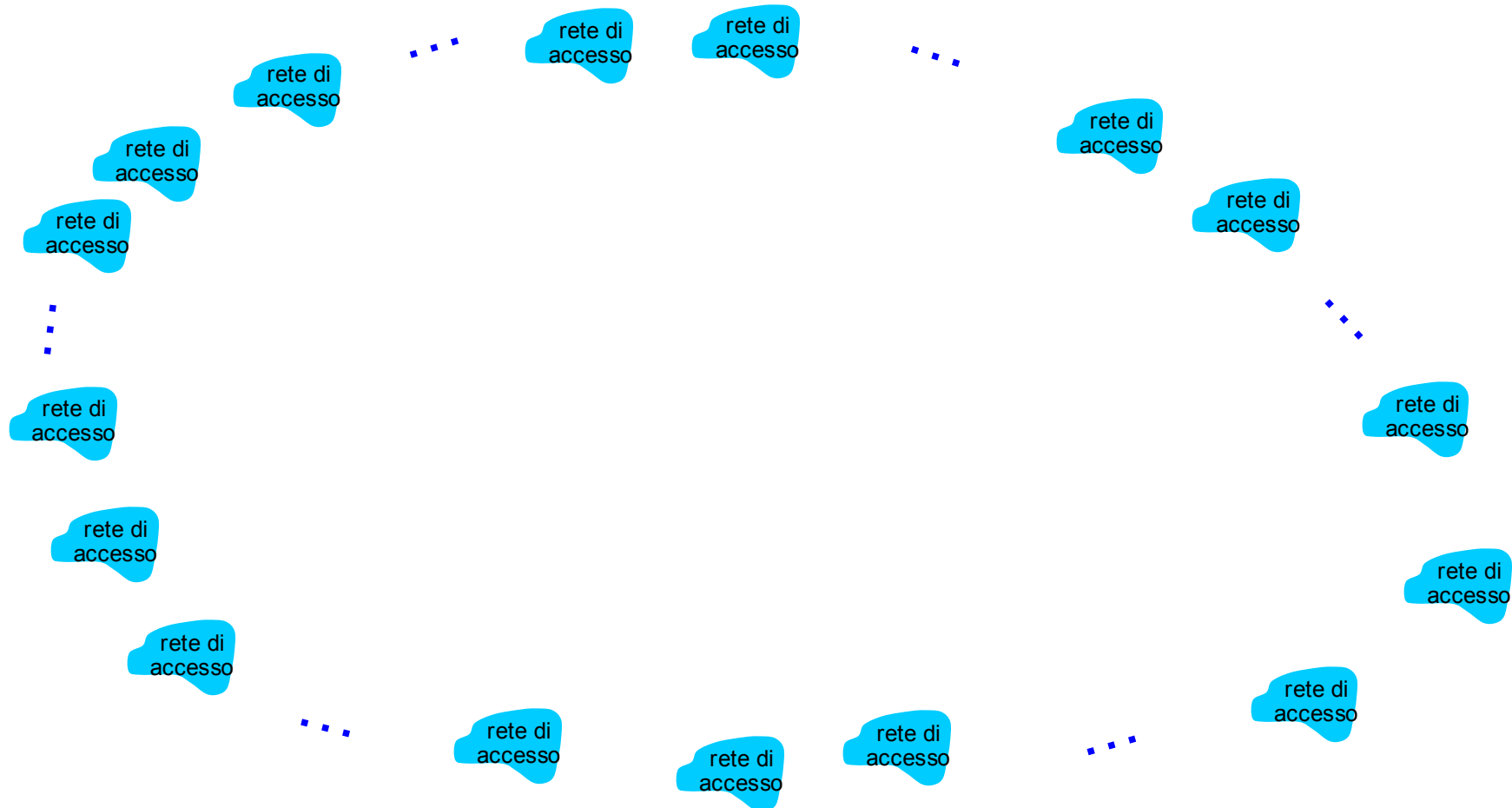
Internet: una rete di reti

- Gli host si collegano a Internet tramite un **ISP di accesso**
- Gli ISP di accesso devono essere connessi tra loro
 - per permettere la comunicazione tra qualunque coppia di host
- Internet ha una struttura molto complessa la cui evoluzione è stata pilotata da **fattori economici** e **politici** più che dalle prestazioni



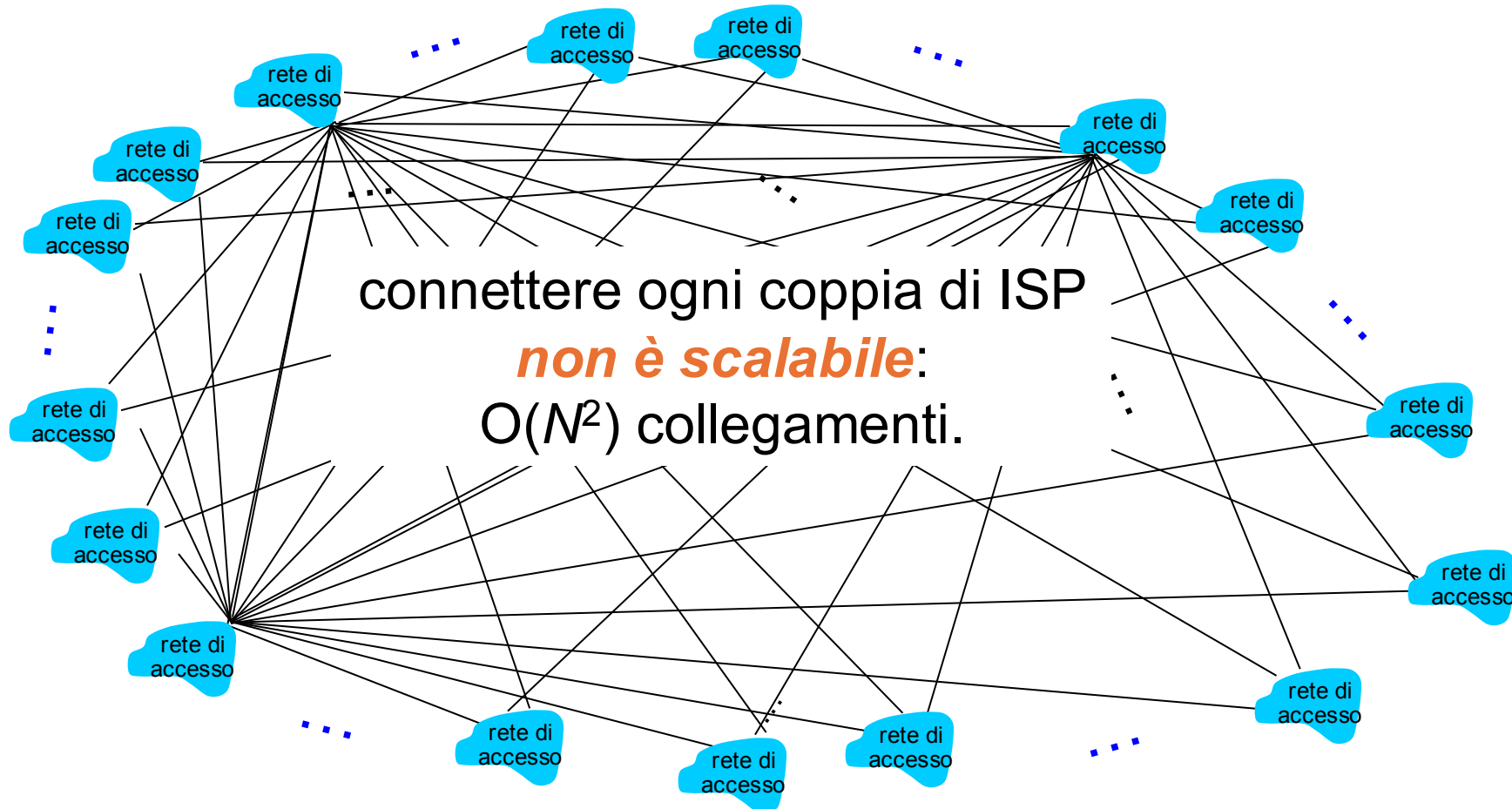
Internet: una rete di reti

Domanda: dati milioni di ISP di accesso, come è possibile connetterli?



Internet: una rete di reti

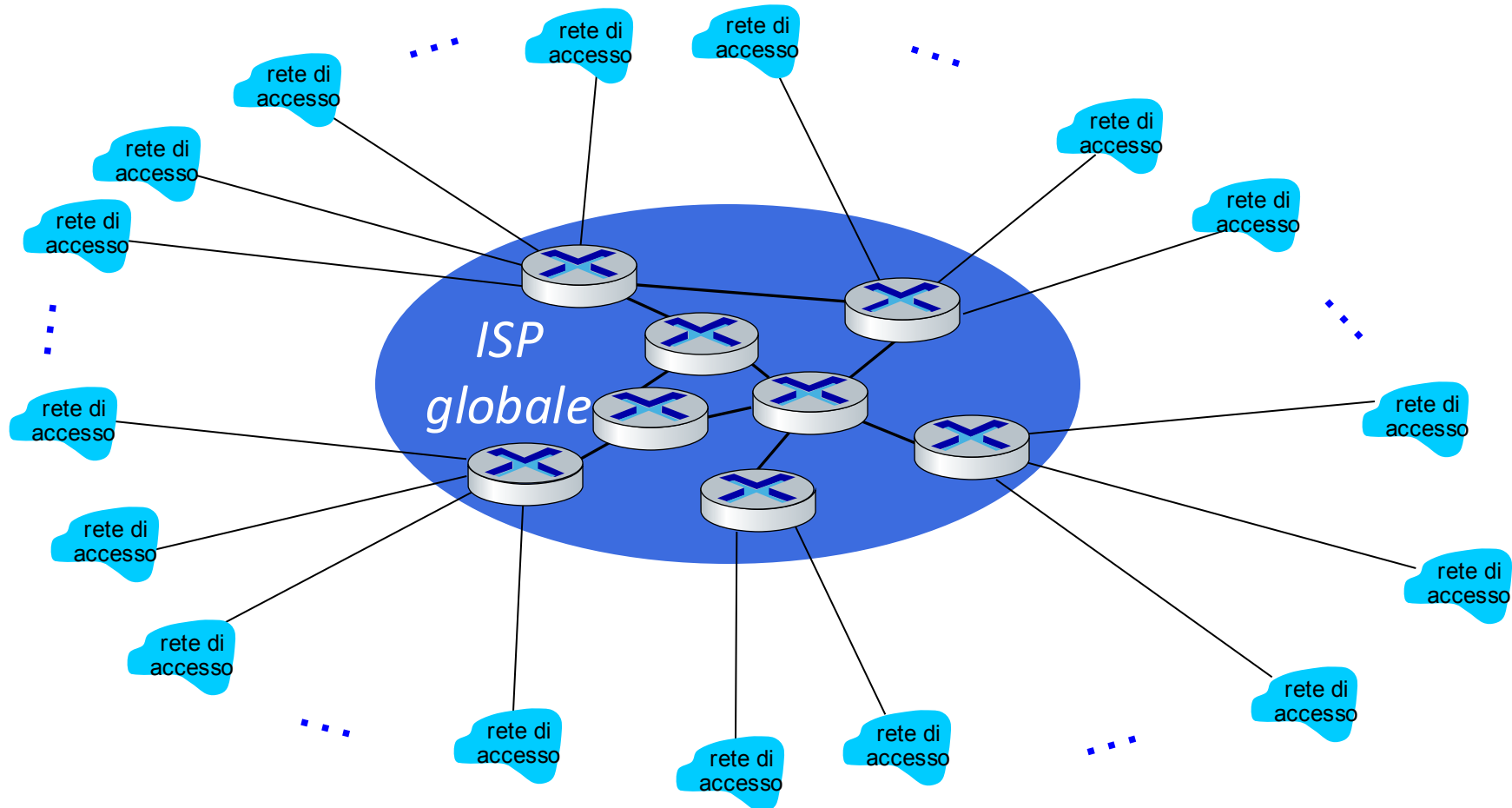
Domanda: dati milioni di ISP di accesso, come è possibile connetterli?



Struttura 1

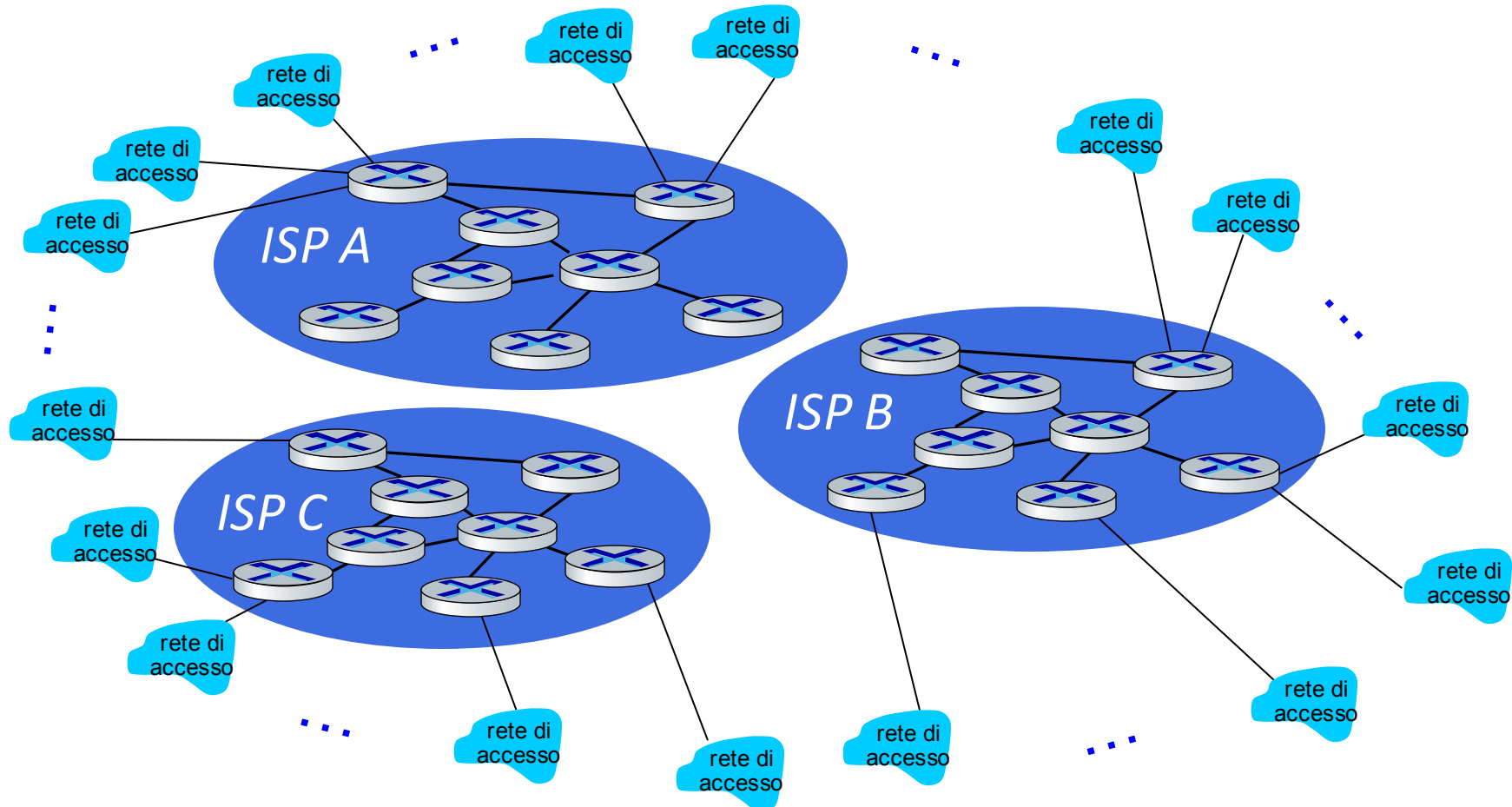
Opzione: connettere ciascun ISP a un ISP globale di transito?

ISP cliente e fornitore stipulano un accordo economico



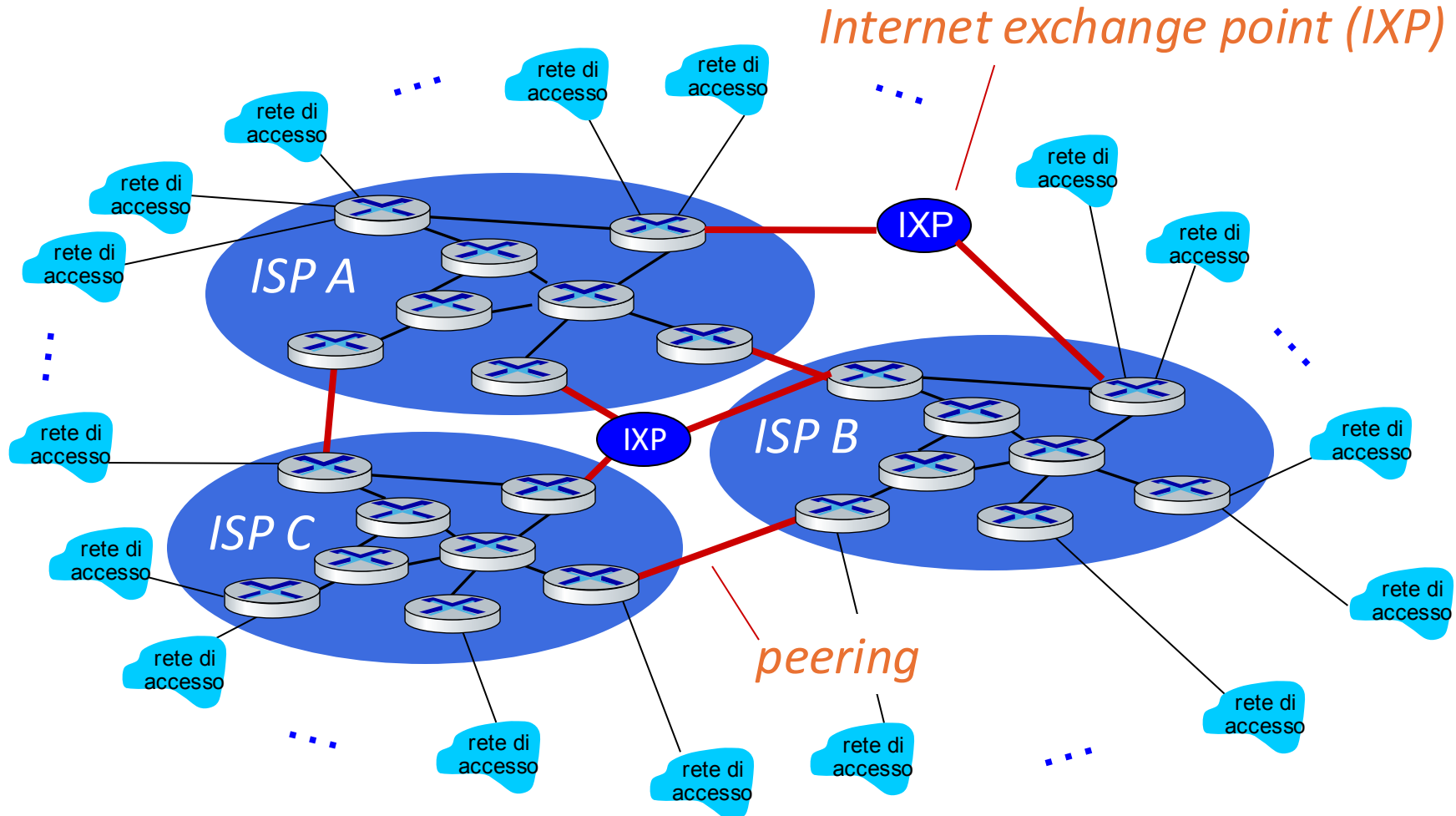
Struttura 2

Se fosse fattibile creare un ISP di transito, ci sarebbero *competitors*



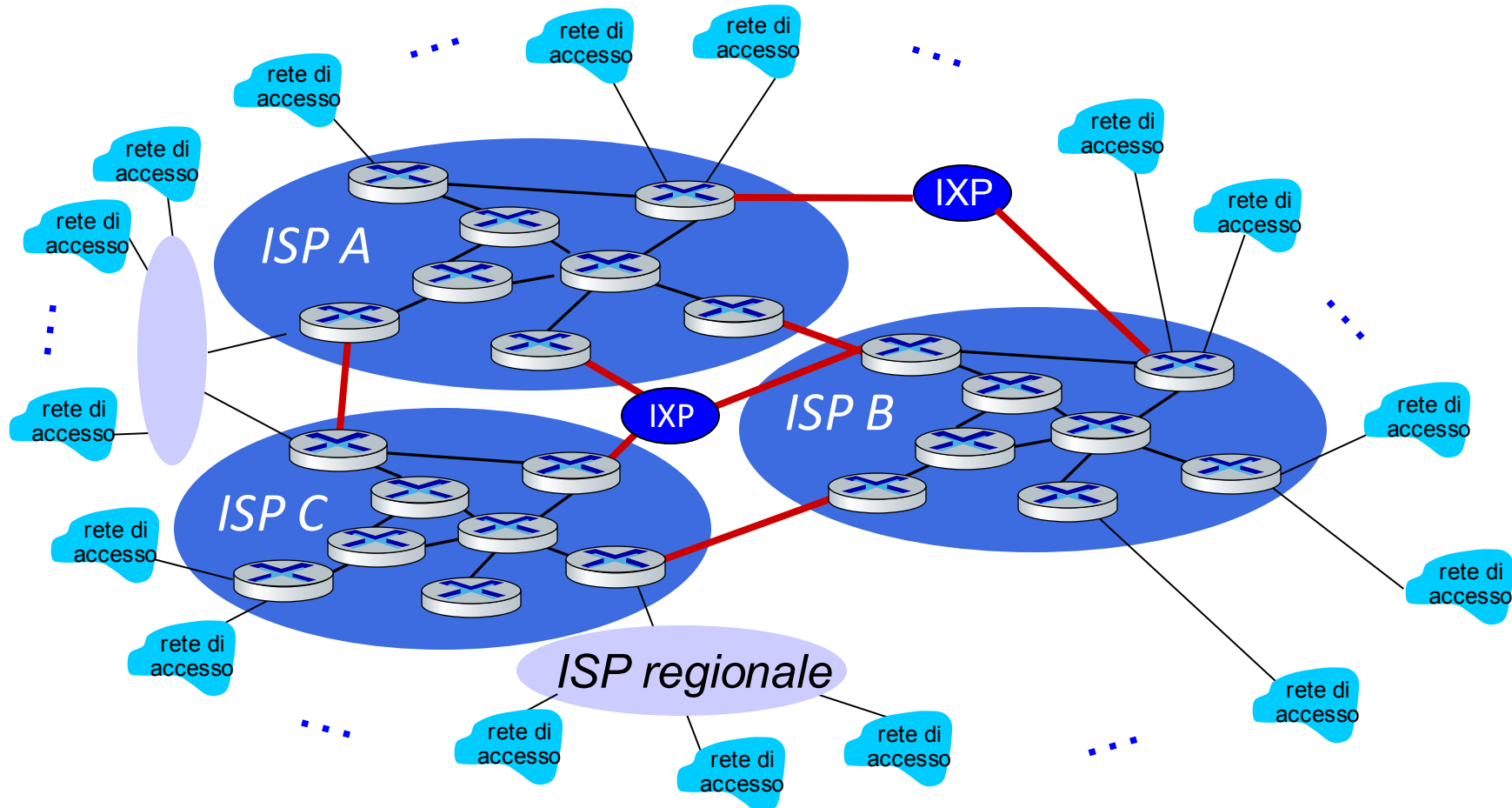
Struttura 3

Se fosse fattibile creare un ISP di transito, ci sarebbero *competitors* ... che dovranno essere connessi



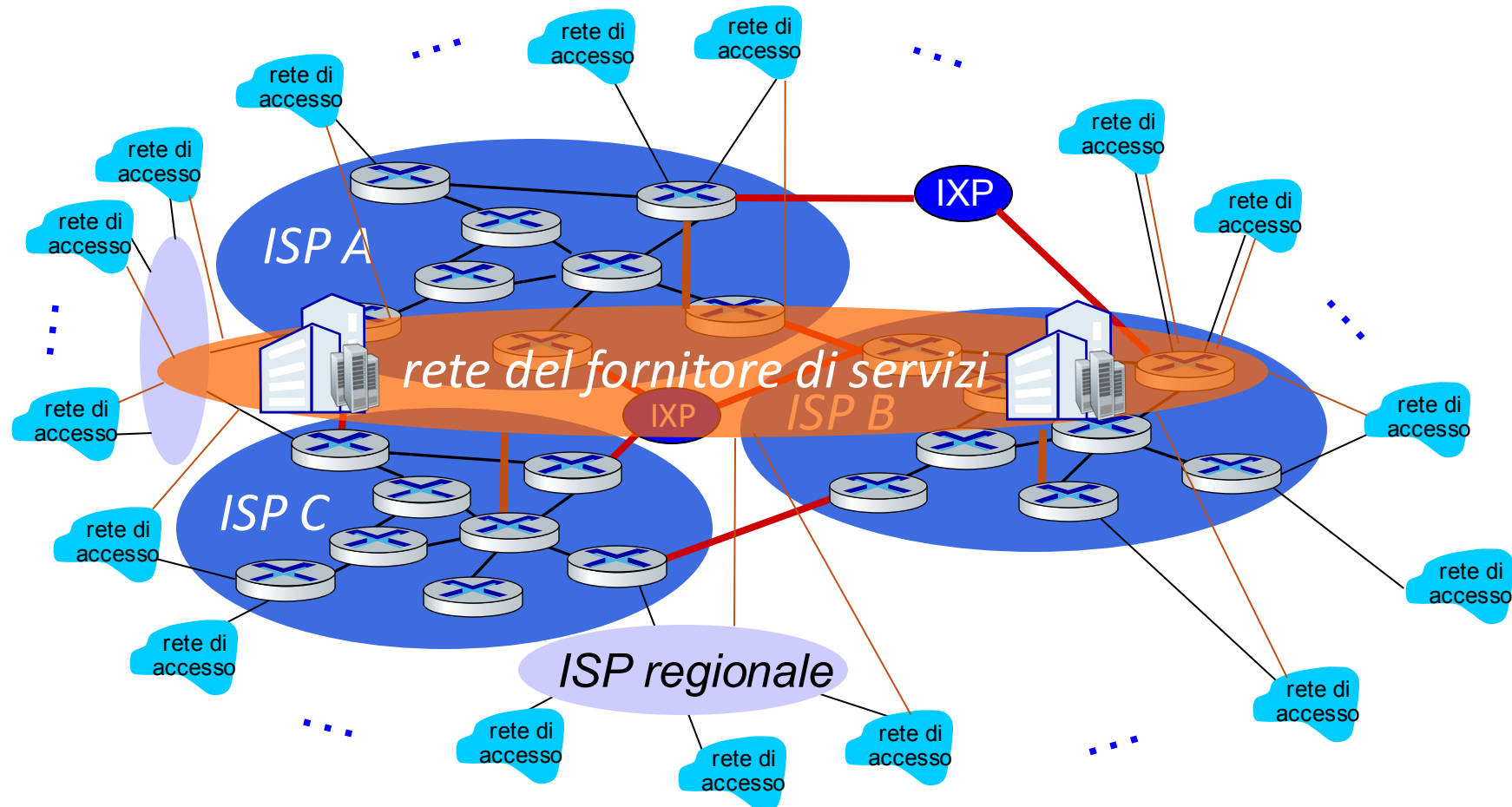
Struttura 4

... e potrebbero nascere ISP regionali per connettere le reti di accesso agli ISP di primo livello (*tier 1*) ...

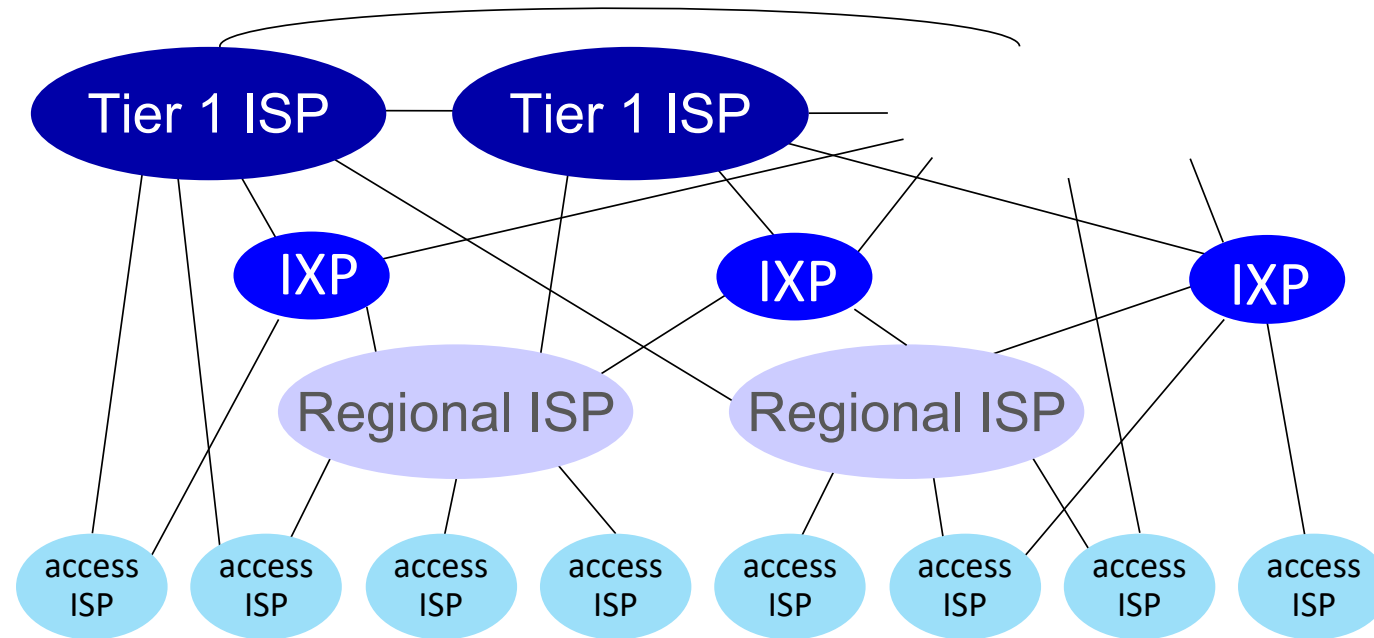


Struttura 5

... e le reti dei fornitori di contenuti (es. Google) potrebbero gestire la propria rete, per portare i servizi e i contenuti vicino agli utenti finali.



Internet oggi



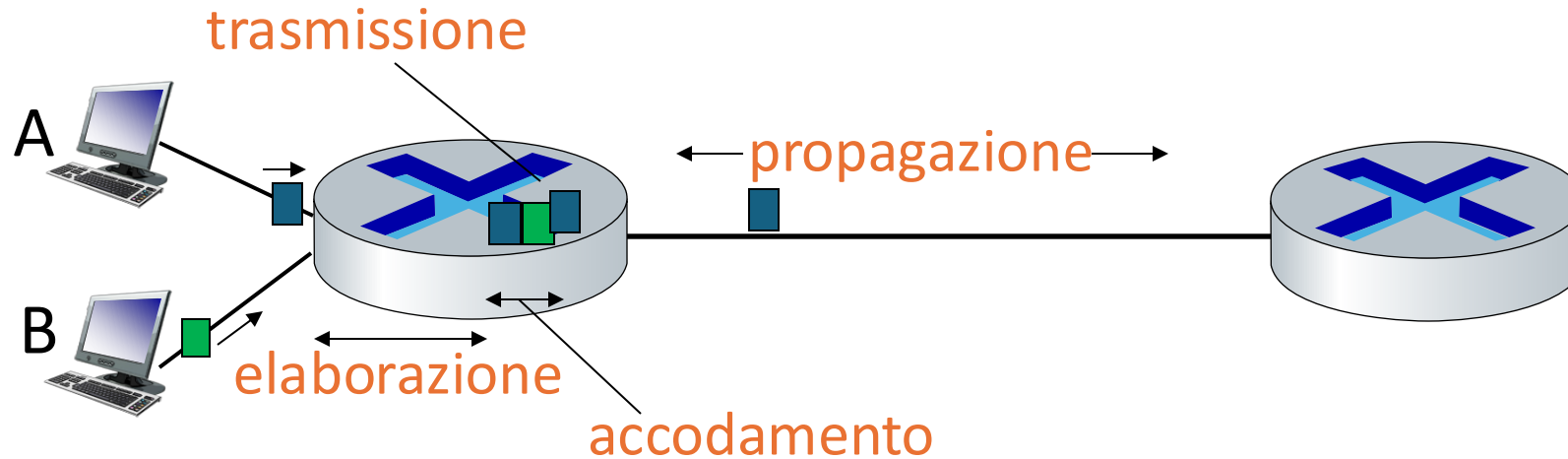
Al “centro” ci sono poche reti molto connesse

- **ISP commerciali di primo livello** (es. Level 3, Sprint, AT&T, NTT), copertura nazionale e internazionale
- **content provider networks** (e.g., Google): reti private che collegano i loro data center a Internet, anche by-passando ISP tier-1 e regionali
- 600 **IXP** permettono il peering tra ISP dello stesso livello

Performance delle reti a commutazione di pacchetto

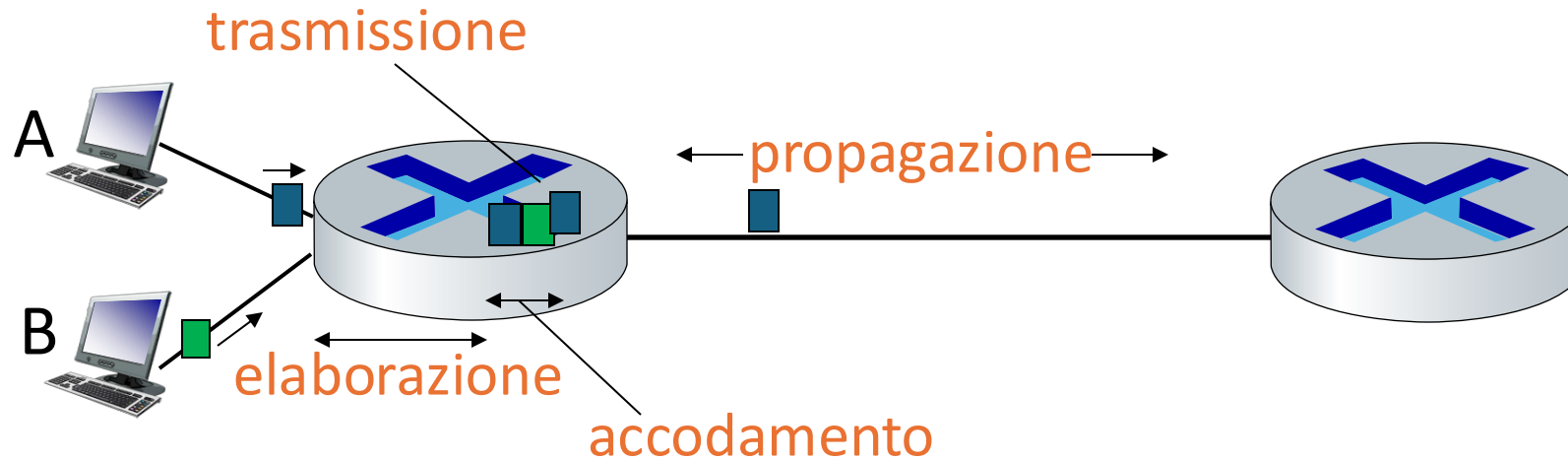
- Ritardo
- Throughput
- Prodotto rate per ritardo
- Traceroute

Quattro fonti di ritardo



- A ogni tappa tra sorgente e destinazione, un pacchetto subisce **ritardi**:
 - di **elaborazione** = controllo errori a livello di bit e scelta di inoltro $\sim \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s}$
 - di **accodamento** = attesa nei buffer prima della trasmissione $\sim \mu\text{s} - \text{ms} = 10^{-6} - 10^{-3} \text{ s}$
 - di **trasmissione** = L/R per trasmettere tutti i bit sul collegamento $\sim \mu\text{s} - \text{ms} = 10^{-6} - 10^{-3} \text{ s}$
 - di **propagazione** = propagazione di un bit da un router/host al successivo
 - è il rapporto d/v tra la distanza d tra i due router e la velocità di propagazione del mezzo fisico del collegamento v ; tipicamente $v \simeq 2-3 \times 10^8$; $\sim \text{ms}$ per reti grandi, altrimenti trascurabile

Ritardo totale di nodo



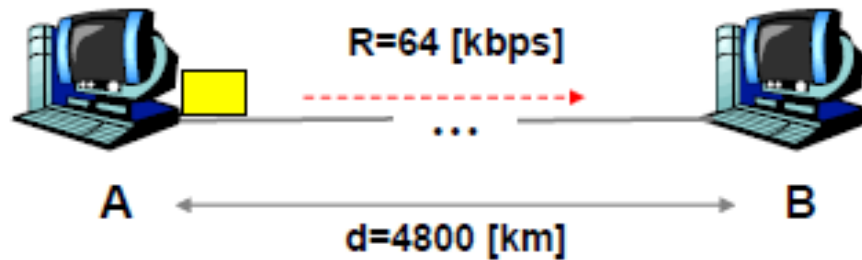
- Il ritardo a ciascun nodo n è dunque dato dalla somma dei precedenti:

$$d_n = d_{elab} + d_{acc} + d_{trasm} + d_{prop}$$

Esempio

- Invio di 1 file di 1 Mbit su un link di lunghezza di 4800 km

$$d_{\text{propagation}} = \frac{d [\text{m}]}{s [\text{m/sec}]} = \frac{4800 \cdot 10^3 [\text{m}]}{3 \cdot 10^8 [\text{m/sec}]} = 0.016 [\text{sec}]$$



- Velocità di trasmissione 64 kbps

$$d_{\text{transmission}} = \frac{L [\text{bits}]}{R [\text{bps}]} = \frac{10^6 [\text{bits}]}{64 \cdot 10^3 [\text{bps}]} = 15.625 [\text{sec}]$$

- Velocità di trasmissione 1 Gbps

$$d_{\text{transmission}} = \frac{L [\text{bits}]}{R [\text{bps}]} = \frac{10^6 [\text{bits}]}{10^9 [\text{bps}]} = 0.001 [\text{sec}]$$

Disclaimer – Queste slide del corso sono ri-adattate da quelle disponibili per i testi in adozione o consigliati:

- J.F Kurose e K.W. Ross, *Computer Networking: A Top-Down Approach*, ottava edizione, Pearson, 2020
 - Copyright © 1996-2023 J.F Kurose e K.W. Ross, tutti i diritti riservati
- Behrouz A. Forouzan e Firouz Mosharraf, *Reti di Calcolatori – Un approccio top-down*, seconda edizione, McGraw-Hill Education, 2023
 - Copyright © 2024 McGraw-Hill Education (Italy) S.r.l., tutti i diritti riservati