

# Introduzione alle reti

**Reti di Calcolatori**  
**AA. 2020-2021**

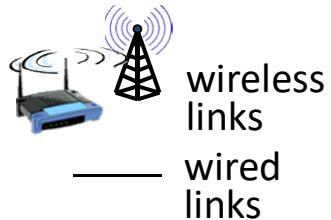
Docente: Federica Paganelli  
Dipartimento di Informatica  
[federica.paganelli@unipi.it](mailto:federica.paganelli@unipi.it)

# In questa lezione vedremo...

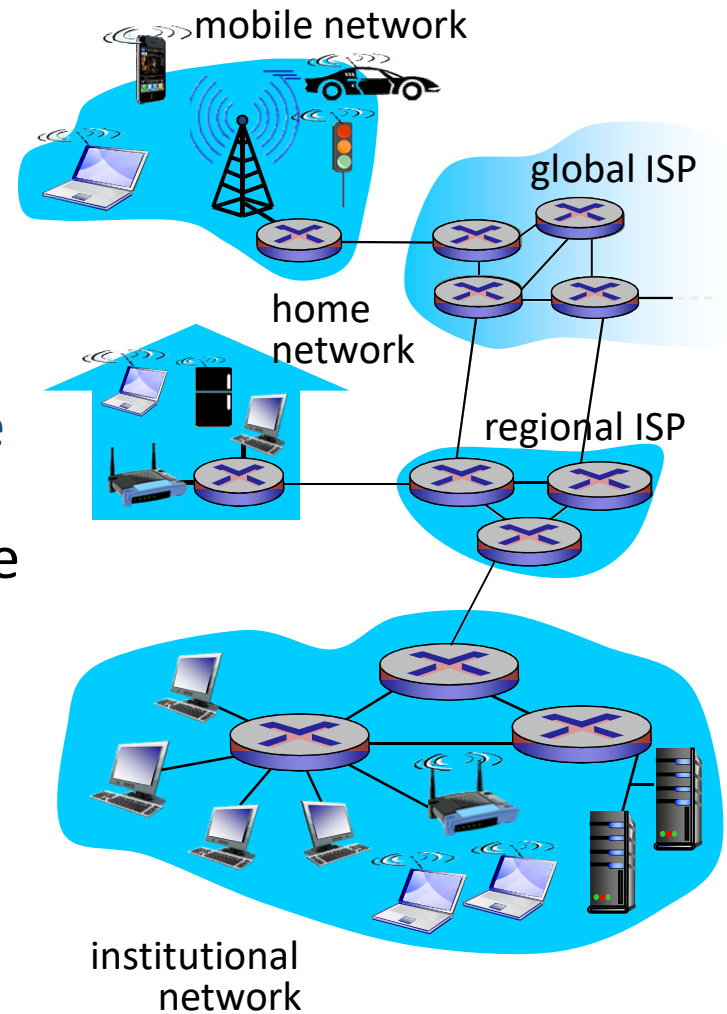
- Definizione di Rete
- Tipologie di Reti
- Commutazione di circuito vs commutazione di pacchetto
- Metriche di riferimento (es. larghezza di banda, ritardo, ecc.)

Reti

# Cos'è Internet



- Miliardi di dispositivi connessi
- hosts = sistemi terminali
- Link di comunicazione
  - Fibra ottica, rame, onde radio, satellite
- Dispositivi di interconnessione
- *router e switch*



# Internet delle cose



IP picture frame  
<http://www.ceiva.com/>



Web-enabled toaster +  
weather forecaster



Tweet-a-watt:  
monitor energy use



Internet  
refrigerator



Slingbox: watch,  
control cable TV remotely

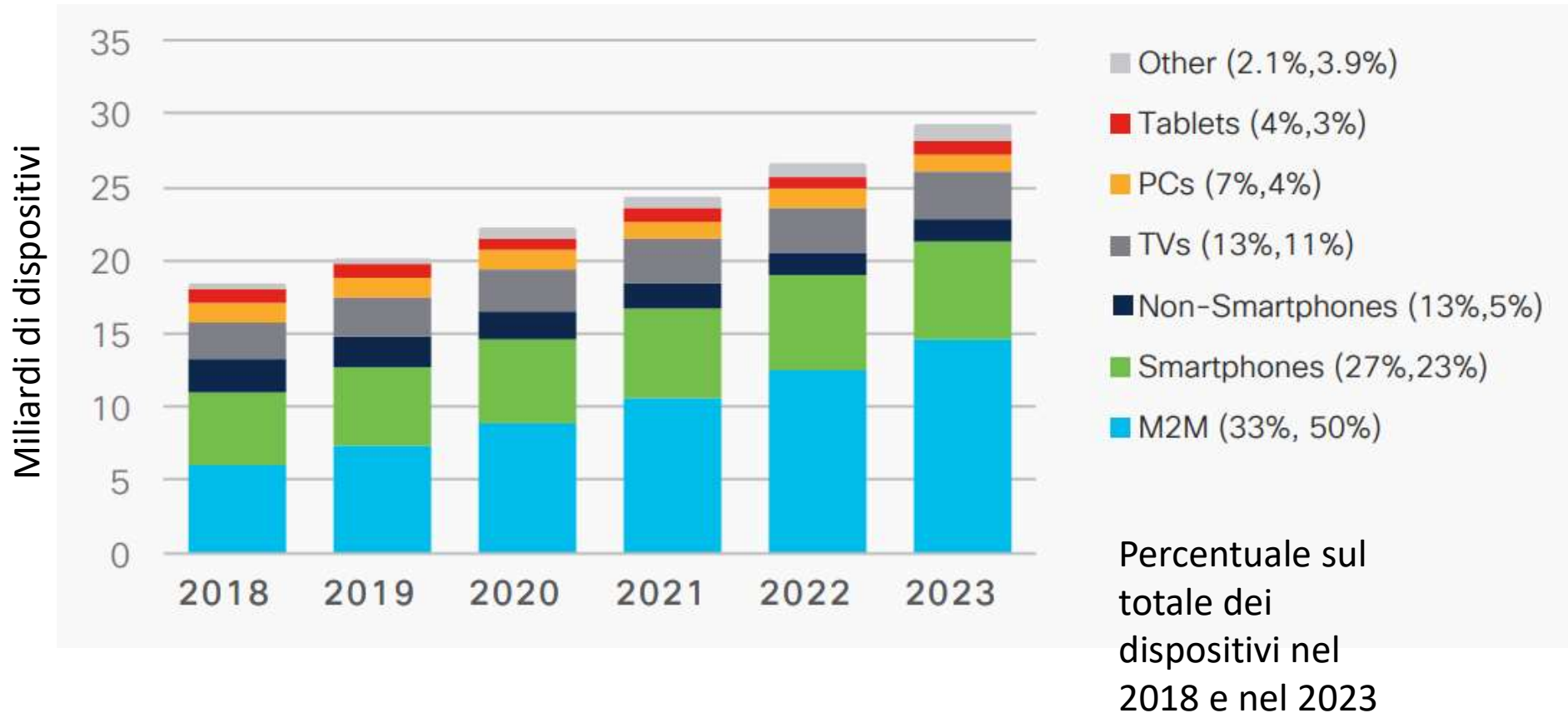


sensorized,  
bed  
mattress



Internet phones

# Analisi e previsioni



Cisco Annual Internet Report (2018–2023)

<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf>

# Definizioni

**RETE** = un'interconnessione di dispositivi in grado di scambiarsi informazioni, quali sistemi terminali, router, switch e modem.

I sistemi terminali sono chiamati **host**, ad esempio:

- macchina di proprietà degli utenti finali e dedicata ad eseguire applicazioni, quale un computer, un portatile, un cellulare o un tablet.
- server, tipicamente un computer con elevate prestazioni destinato a eseguire programmi che forniscono servizio a diverse applicazioni utente come, per esempio, la posta elettronica o il Web.
- Router: dispositivi che interconnettono reti
- Switch: dispositivi che collegano fra loro più host a livello locale
- Collegamenti (link): mezzi trasmissivi (cablati, wireless)

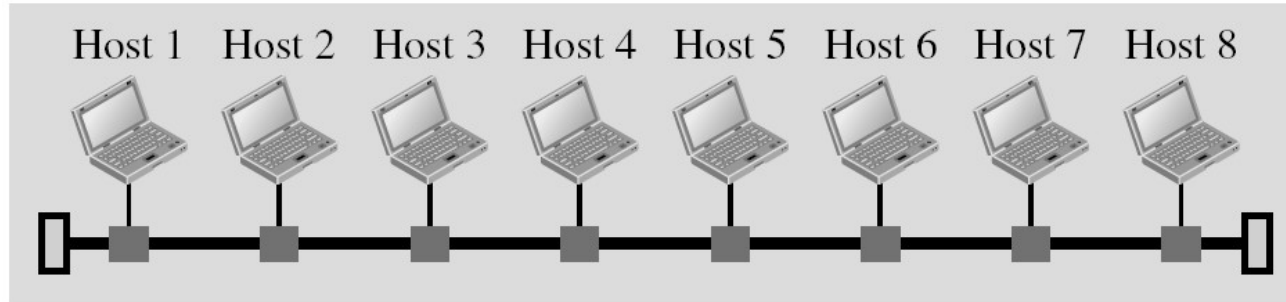
N.B. sul testo Forouzan si differenziano i termini *host* (macchina dell'utente finale) e *server*

# Local Area Network (LAN)

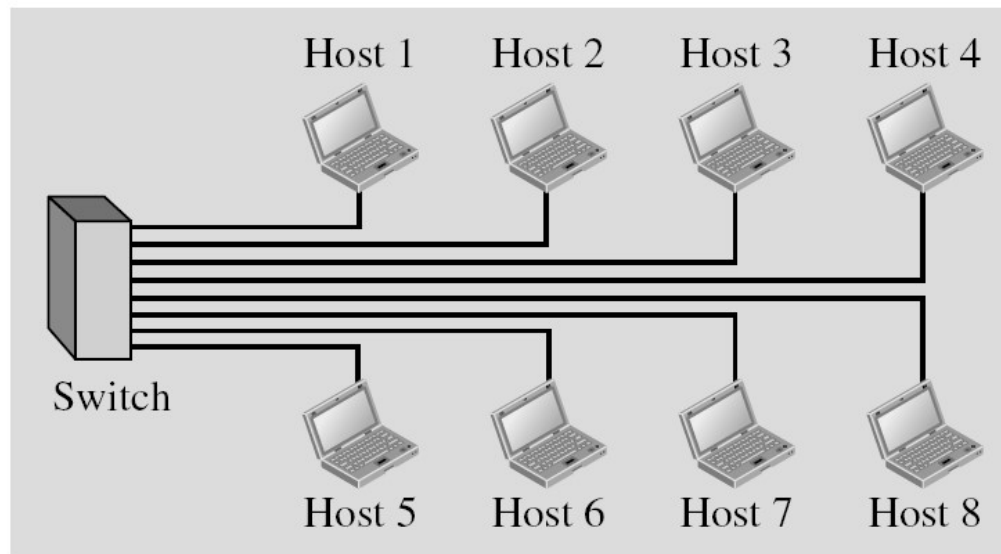
- Le LAN (o reti locali) sono reti di computer circoscritte ad un'area limitata (ufficio, scuola, edificio, ecc.)
- Sono di proprietà di una organizzazione (reti private)
- Hanno un'estensione che arriva fino a qualche km (tipicamente)
- Sono molto usate per connettere sistemi terminali, es. PC, workstation, stampanti



# Local Area Network (LAN)









a. LAN con cavo condiviso (obsoleta)



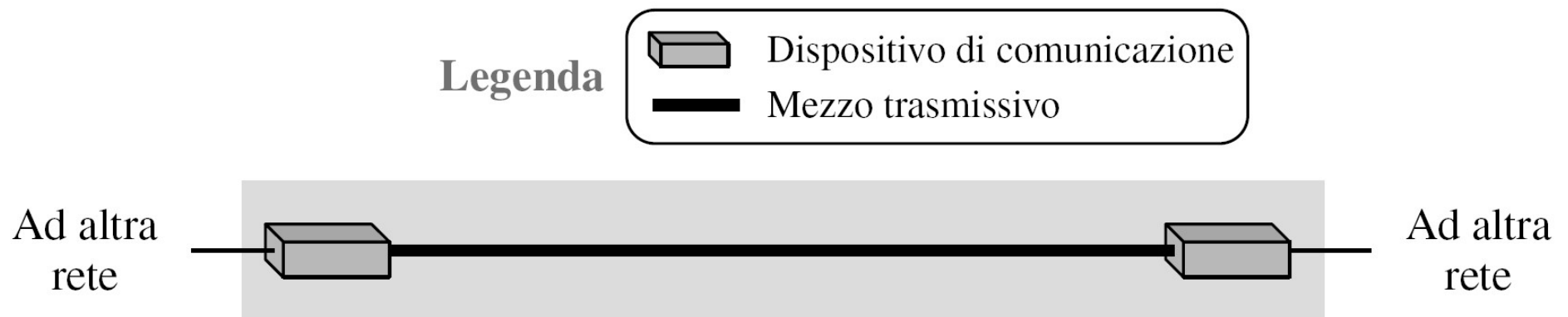
b. LAN con switch (moderna)

## Legenda

	Sistema terminale (di qualsiasi tipo)
	Switch
	Connettore
	Terminatore di cavo
	Cavo condiviso
	Collegamento

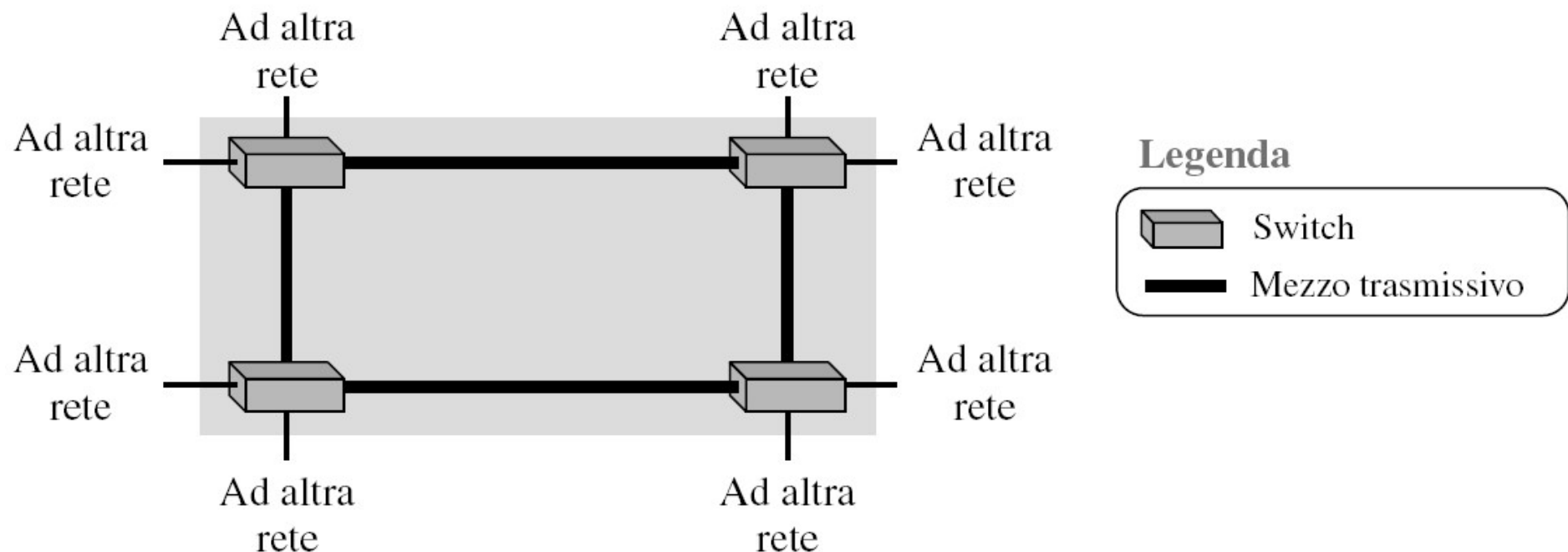
# Wide Area Network (WAN)

- Una **WAN** (o **rete geografica**) è una rete il cui compito è di interconnettere LAN o singoli host separati da distanze geografiche.
- Gestita da un operatore di rete che fornisce servizi ai clienti
- **WAN punto-punto**: collega due dispositivi tramite un mezzo trasmissivo (es. cavo in fibra ottica, ponti radio...)



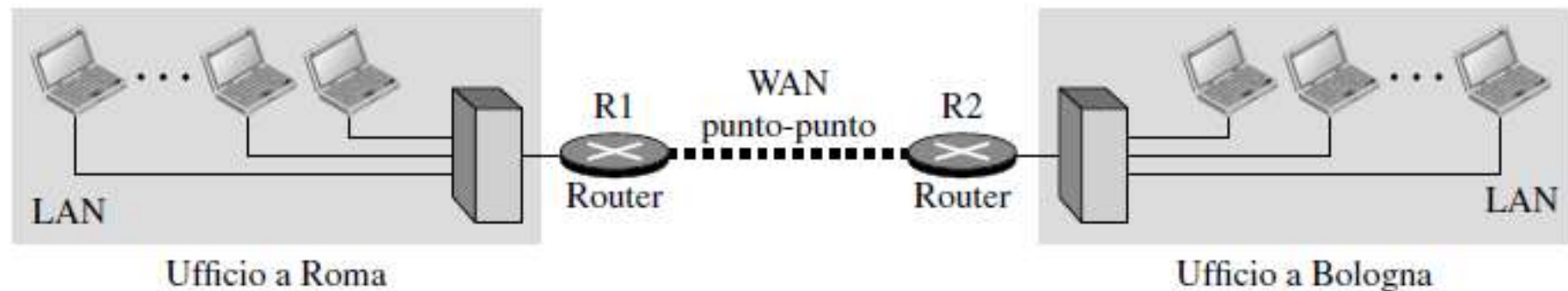
# WAN a commutazione

- WAN a commutazione: collega più di due punti di terminazione (ad esempio dorsali Internet)
- Elementi di commutazione: elaboratori specializzati utilizzati per connettere fra loro due o più linee di trasmissione.

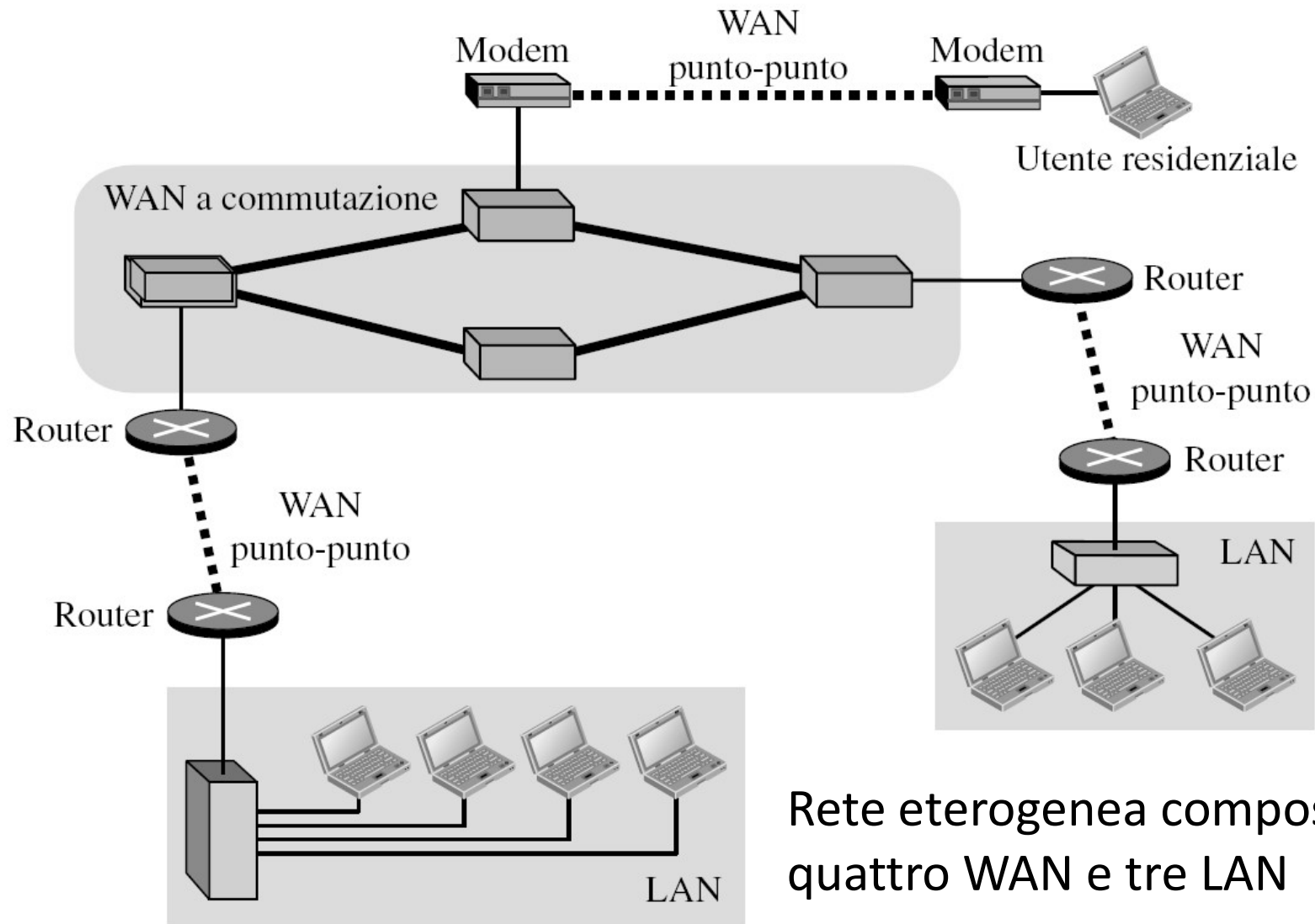


# Interconnessione di reti

- Uno scenario molto comune sono reti locali interconnesse tramite WAN.
- Ad es. reti locali nelle sedi di aziende dislocate sul territorio nazionale
  - Rete internet privata che interconnette le reti locali dei vari uffici.



# Interconnessione di reti



Rete eterogenea composta da quattro WAN e tre LAN

# Commutazione

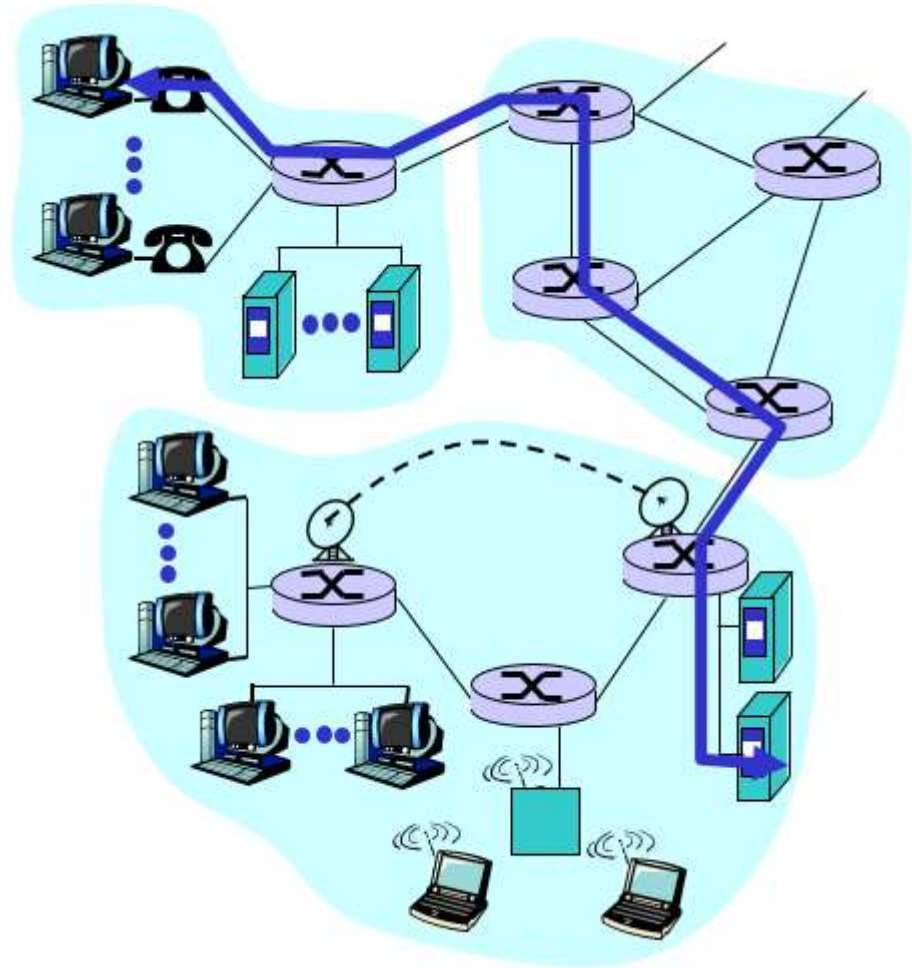
- Una internet (o internetwork) è data dall'interconnessione di reti, composte da link e dispositivi capaci di scambiarsi informazioni.
- In particolare, i dispositivi si distinguono in:
  - Sistemi terminali (host)
  - Dispositivi di interconnessione che si trovano nel percorso (o rotta) tra i sistemi sorgente e destinazione nella comunicazione tra host.

**Tecniche di commutazione:** modalità con cui viene determinato il percorso sorgente-destinazione e vengono dedicate ad esso le risorse della rete

- Circuit-switched network – Reti a commutazione di circuito
- Packet-switched network – Reti a commutazione di pacchetto

# Commutazione di circuito

- Instaura un **cammino dedicato** tra i due dispositivi che vogliono comunicare
  - una serie di linee di trasmissione e nodi di commutazione che collegano sorgente e destinazione
- sul percorso vengono dedicate risorse alla comunicazione (canale logico o circuito)
  - banda di frequenza o slot di trasmissione sulle linee di trasmissione
  - capacità commutative nei nodi
- le risorse allocate sono garantite per tutta la durata della comunicazione





# Commutazione di circuito

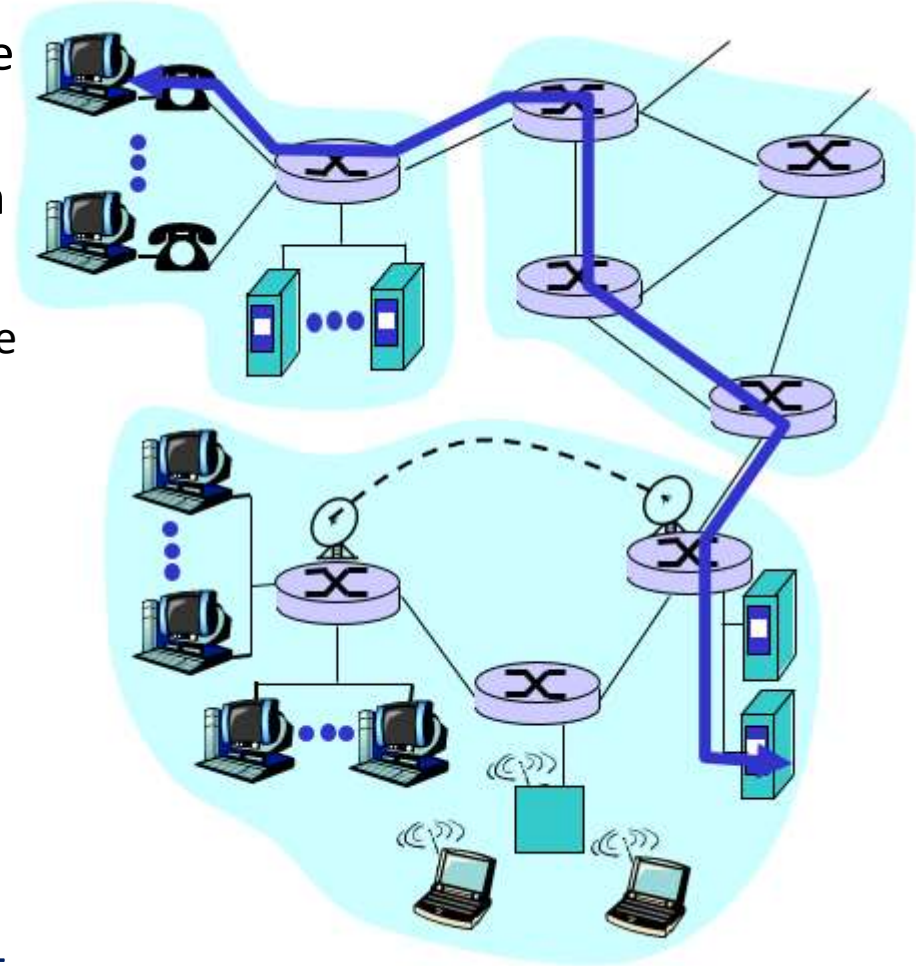
## Svantaggi

- Necessaria una fase di instaurazione (setup) della comunicazione
- le risorse rimangono inattive se non utilizzate (non c'è condivisione)
  - Ad es. silenzi durante conversazione telefonica

## Vantaggi

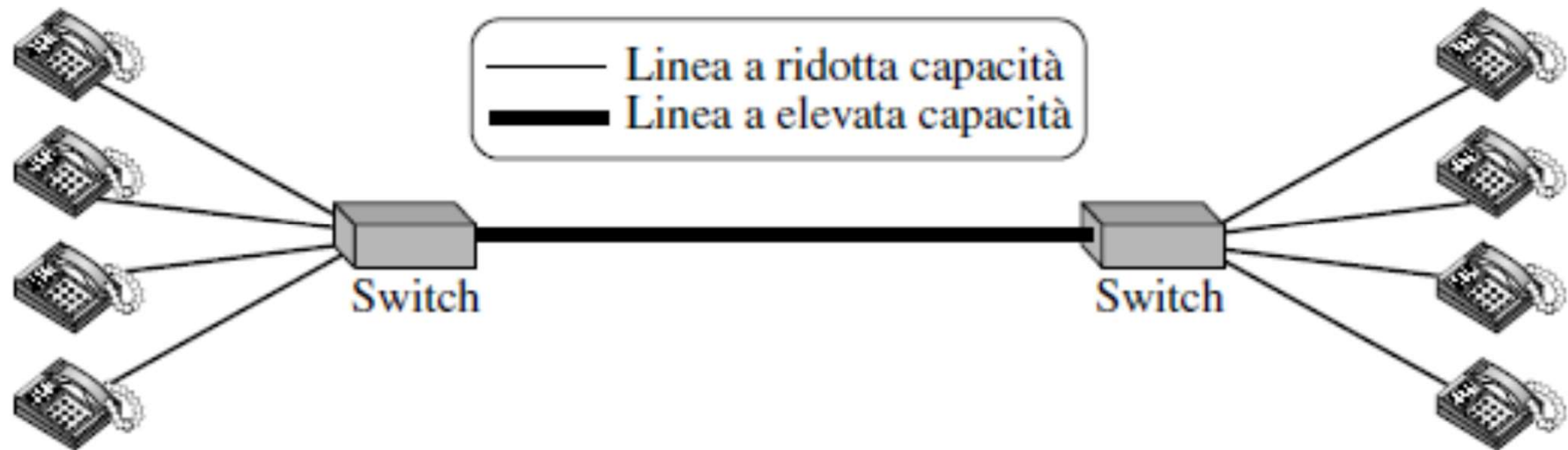
- Performance (garantita)
- Esempio: rete Telefonica fissa tradizionale (Public Switched Telephone Network)

Gli operatori di telefonia stanno però migrando le reti PSTN verso sistemi All-IP (commutazione di pacchetto).





# Commutazione di circuito



Circuito dedicato per l'intera durata della connessione.  
Non c'è condivisione  
Problema: poca flessibilità nell'utilizzo delle risorse  
(overprovisioning)

# Commutazione di pacchetto

Il flusso di dati punto-punto viene suddiviso in *pacchetti*

- I pacchetti degli utenti A e B *condividono* le risorse di rete
- ogni pacchetto è instradato singolarmente e indipendentemente dagli altri pacchetti della stessa comunicazione (possono seguire lo stesso percorso o percorsi diversi)
- Le risorse vengono usate *a seconda delle necessità*

## Contesa per le risorse

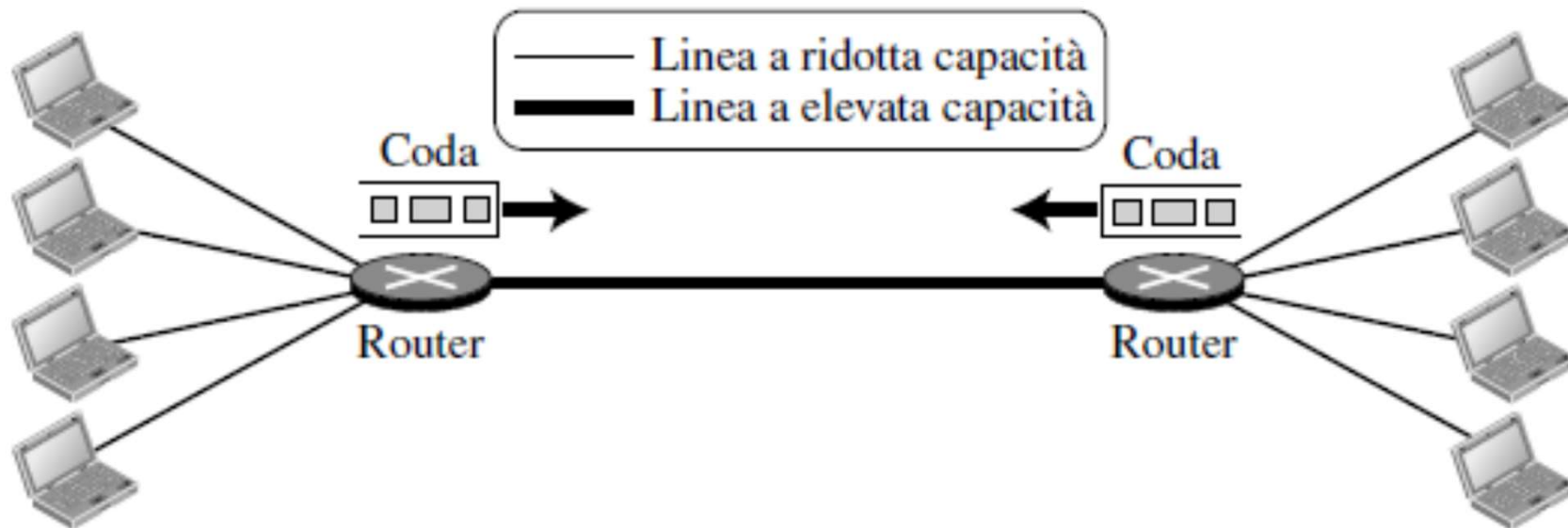
- La richiesta di risorse può eccedere il quantitativo disponibile
- congestione: accodamento dei pacchetti, attesa per l'utilizzo del collegamento

# Commutazione di pacchetto

## Trasmissione store and forward

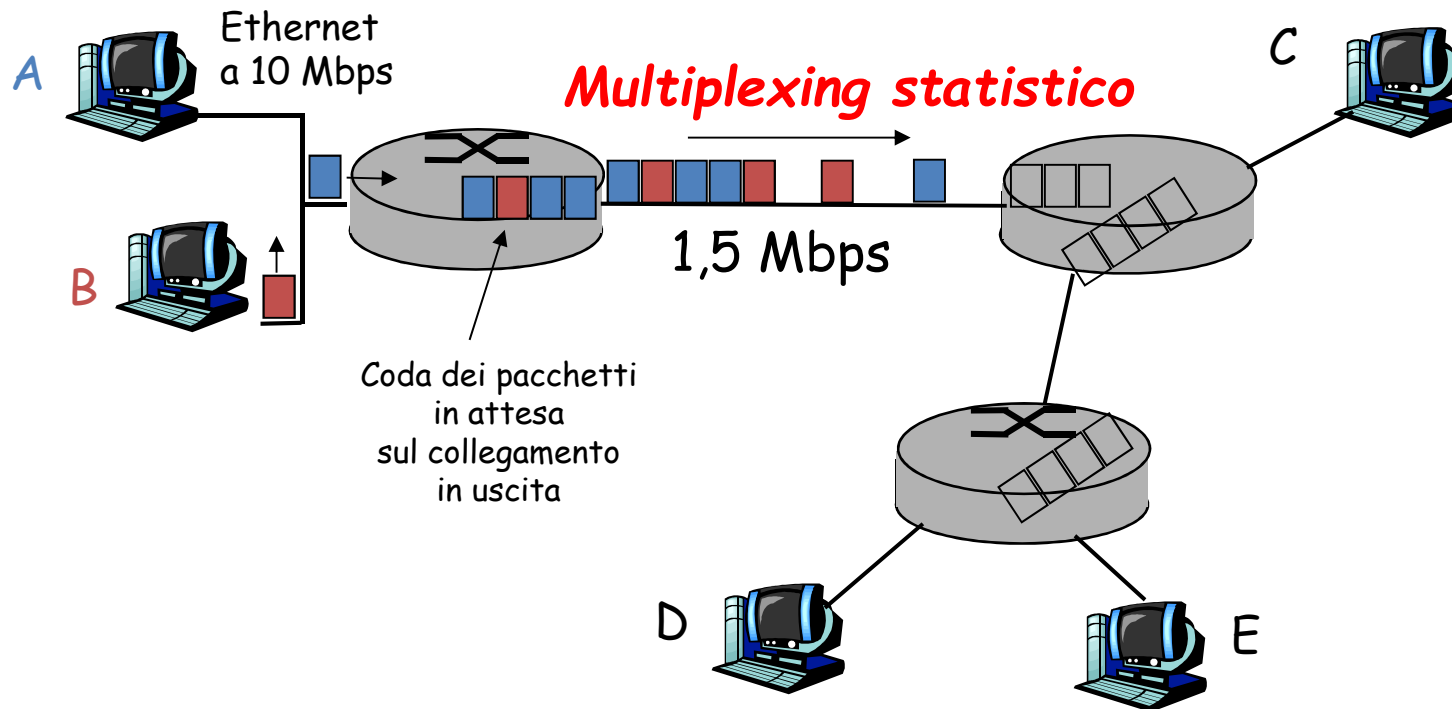
- Il commutatore (es. router) deve ricevere l'intero pacchetto prima di poter cominciare a trasmettere sul collegamento in uscita -> Ritardo di store and forward
- Attesa dei pacchetti in code di output (buffer) -> Ritardi di coda
- I buffer hanno dimensione finita -> Perdita di pacchetti

# Commutazione di pacchetto



- Non c'è un canale dedicato, gli host comunicano scambiandosi pacchetti
- I router possono memorizzare i pacchetti nelle code (buffer)
- Se il collegamento tra i due router è usato alla massima capacità, gli ulteriori pacchetti che arrivano vengono messi in coda
- Utilizzo efficiente delle risorse ma non c'è garanzia nelle prestazioni (es. ritardi)

# Commutazione di pacchetto



- Mentre la commutazione di circuito prealloca l'utilizzo del collegamento trasmissivo con collegamenti garantiti, nella commutazione di pacchetto, pacchetto dopo pacchetto la capacità trasmissiva dei collegamenti sarà condivisa solo tra gli utenti che devono trasmettere sul collegamento
- La sequenza dei pacchetti A e B sul collegamento a 1,5 Mbps non segue uno schema prefissato -> **condivisione di risorse su richiesta** (detta anche multiplexing statistico delle risorse)

# circuit switching vs. packet switching

- esempio

- N=35 utenti condividono un link 1 Mbps
- Ogni utente genera 100kbps quando è “attivo”
- Ogni utente è attivo 10% del tempo

- **Circuit Switching**

Con la commutazione di circuito, occorre riservare 100kbps per ogni utente, in ogni istante. Il link di output può quindi supportare simultaneamente al massimo  $1\text{Mbps}/100\text{kbps} = 10$  utenti

- **Packet Switching**

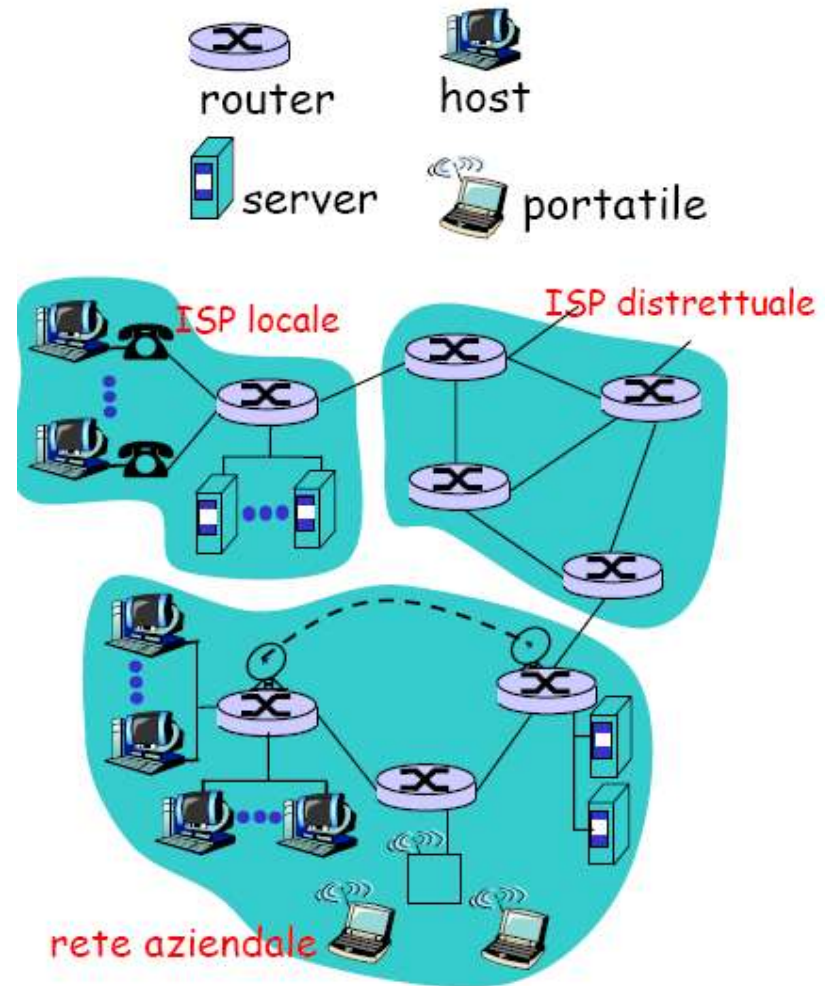
- 10 o meno utenti simultaneamente attivi -> banda richiesta  $\leq 1$  Mbps, nessun ritardo
- Più di 10 utenti attivi simultaneamente -> frequenza aggregata di arrivo dei dati supera la capacità del collegamento in uscita e quindi ritardo di accodamento
- N.B. la probabilità che ci siano 10 o meno utenti attivi contemporaneamente è 0.9996
- con alta probabilità la tecnica del packet switching supporta tutti i 35 utenti senza introdurre alcun ritardo!

# Internet

- Una internet (con i minuscola) è costituita da due o più reti interconnesse
- L'internet più famosa è chiamata Internet (l maiuscola) ed è composta da migliaia di reti interconnesse
- Ogni rete connessa a Internet deve usare l'Internet Protocol (IP) e rispettare certe convenzioni su nomi e indirizzi. Nuove reti si aggiungono facilmente.

# Cos'è Internet: vista “dei componenti”

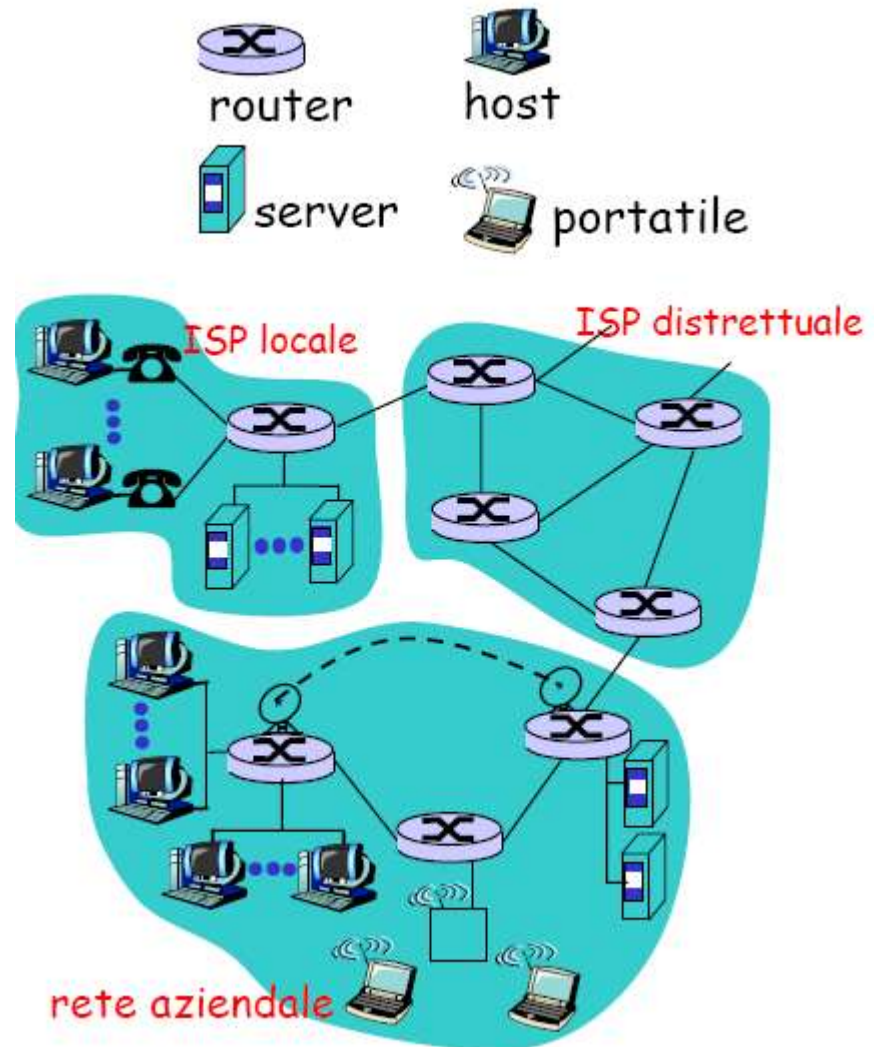
- Milioni di dispositivi interconnessi : hosts, end-systems
  - pc, workstations, servers
  - PDA, telefoni, etc.che supportano le applicazioni (utenti, provider di contenuti, ecc.)
- links di comunicazione
  - fibre ottiche, doppiini telefonici, cavi coassiali, onde radio...
- routers: che instradano pacchetti (sequenze) di dati attraverso la rete





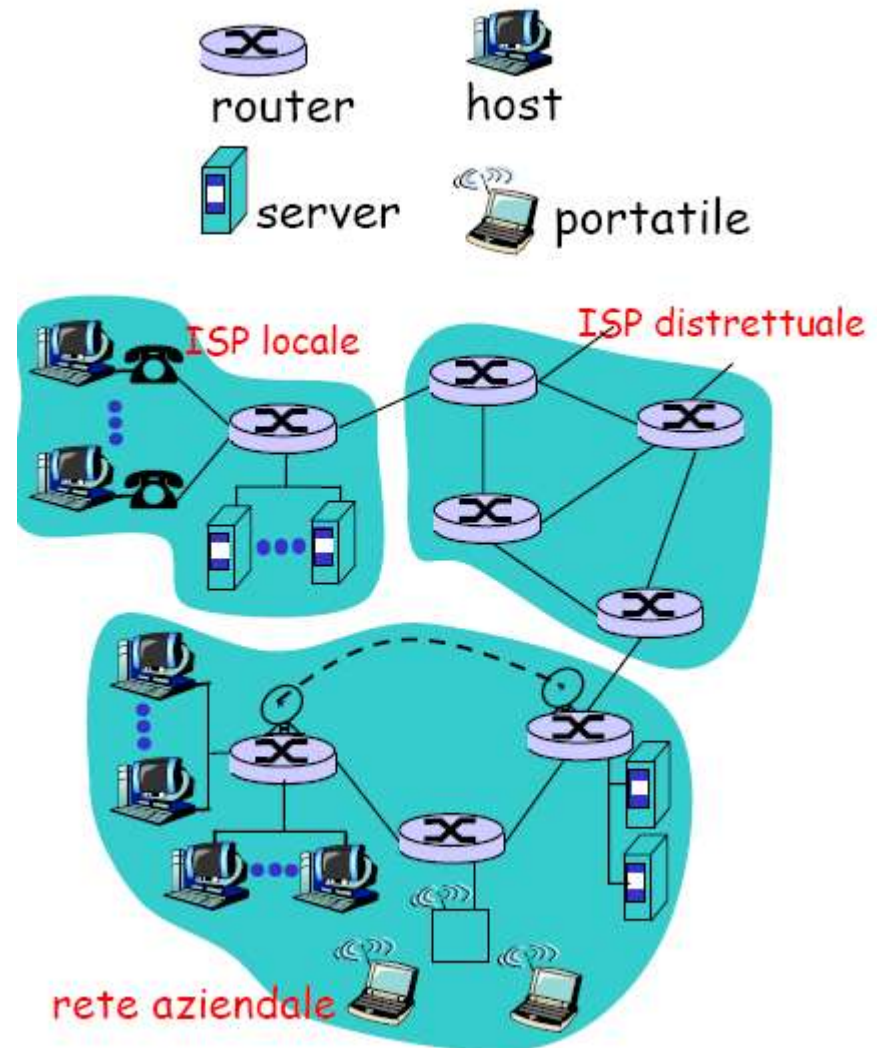
# Cos'è Internet: vista “dei servizi”

- Infrastruttura che fornisce servizi di comunicazione alle applicazioni:
  - WWW, email, giochi, e-commerce, database, controllo remoto, Voice over IP, ecc.
  - Applicazioni distribuite che coinvolgono più host
- Fornisce servizi di comunicazione per le applicazioni:
  - Senza connessione (Connectionless): senza garanzia di consegna
  - Orientati alla connessione (connection-oriented): garantiti in integrità, completezza ed ordine



# Cos'è Internet: vista “delle entità software”

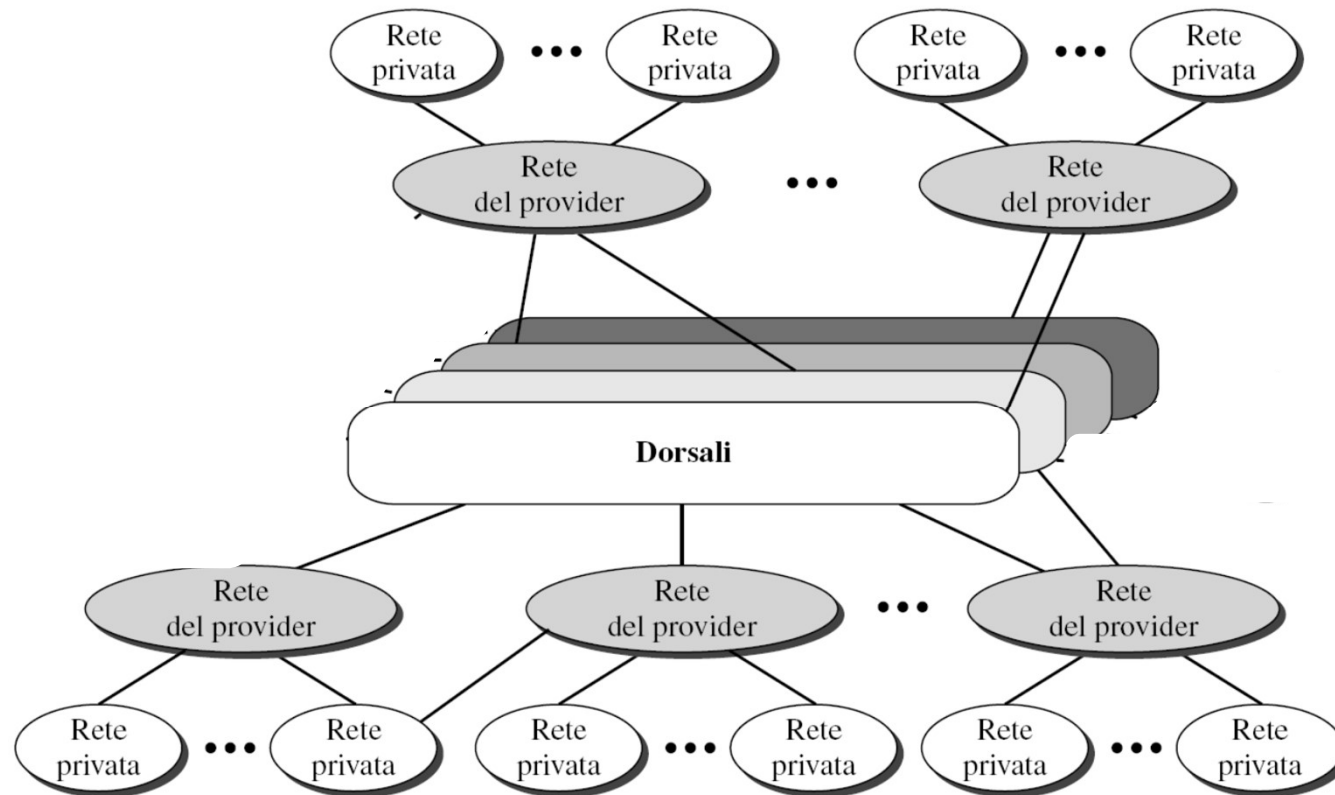
- **Applicazioni:** elaborano e si scambiano le informazioni
- **Protocolli:** regolamentano la trasmissione e la ricezione di messaggi
  - es., TCP, IP, HTTP, FTP, PPP
- **Interfacce:** definite in seguito, sono le “membrane” che separano gli strati della pila protocollare
- **Gli standard Internet e del Web:**
  - IETF: Internet Engineering Task Force
  - W3C



# IETF/RFC/ICANN

- Internet Engineering Task Force (IETF)
  - L'organismo che studia e sviluppa i protocolli in uso su Internet. Si basa su gruppi di lavoro a cui chiunque può accedere
  - <https://www.ietf.org/>
  - RFC/STD (Request For Comments e STanDards): i documenti “ufficiali” che descrivono i protocolli usati su Internet. Sono pubblicamente accessibili in rete.
- Internet Corporation for Assigned Names and Numbers (ICANN)
  - Coordina il sistema dei nomi di dominio (DNS), assegna i gruppi di indirizzi di rete, identificativi di protocollo e ha funzioni di controllo (blando) dello sviluppo di Internet
- World Wide Web Consortium (W3C)
  - comunità internazionale che sviluppa standard aperti per favorire lo sviluppo del Web (es. HTML, XML, Semantic Web, ecc.)
  - <https://www.w3.org/>

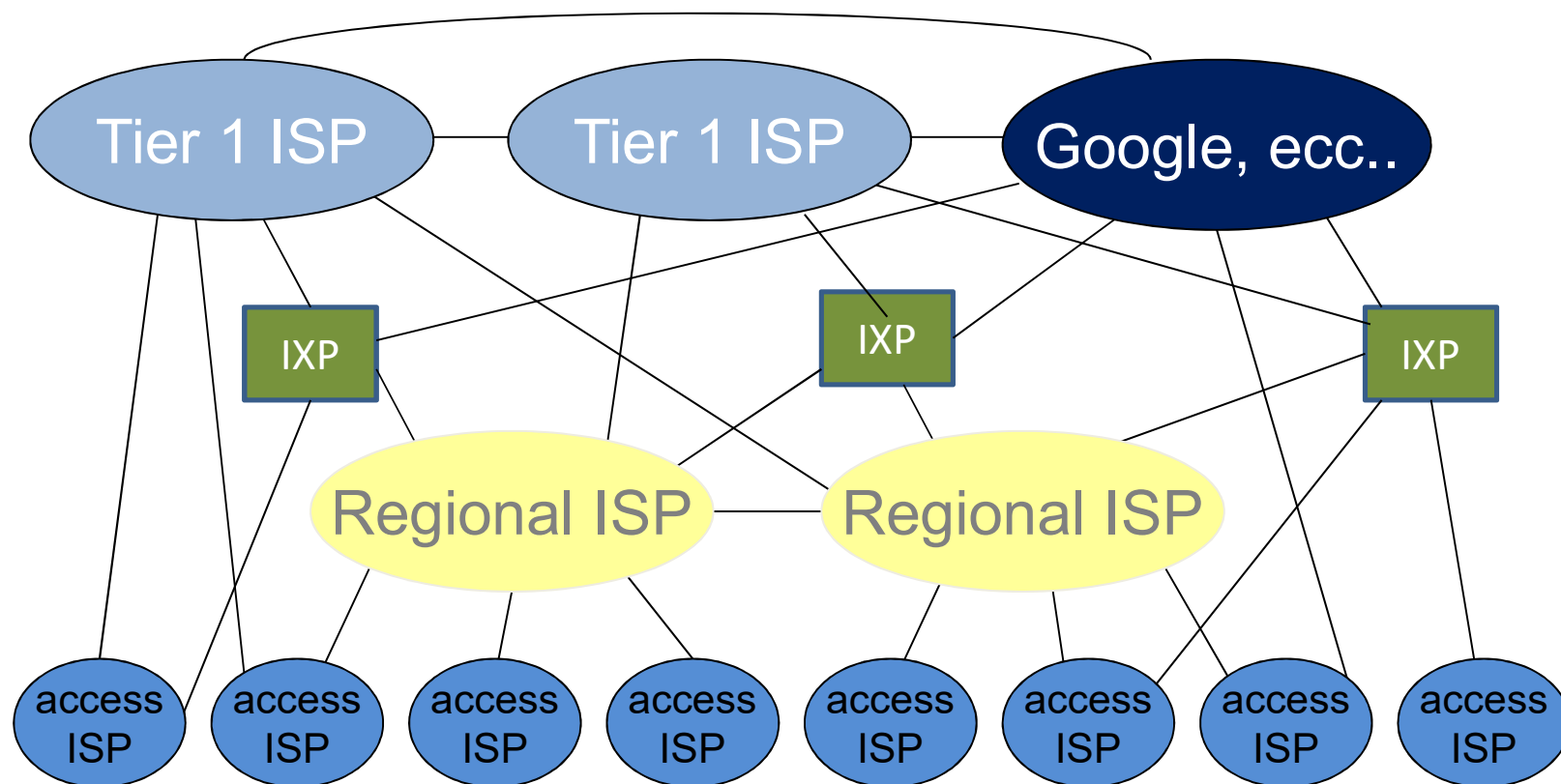
# Internet: rete di reti



- Le reti degli host sono connessi a Internet attraverso una gerarchia di fornitori di servizi Internet (Internet Service Provider)
- Le dorsali sono ISP di livello 1
  - Poche dorsali (circa 11), interconnesse tra di loro
  - ISP di secondo e terzo livello (ISP Regionali e ISP di accesso)

# Internet: rete di reti

- Peering point: accordo tra due ISP di accettare e inoltrare il traffico che ricevono dall'altro
  - IXP: internet eXchange Point: punto d'incontro (può essere gestito da un'azienda terza) per il peering tra due o più ISP



# Reti di accesso

- Il collegamento che connette l'utente al primo router di Internet è detto rete di accesso.
  - Accesso via rete telefonica
    - Servizio dial-up
    - Digital Subscriber line (DSL)
    - Evoluzione tecnologie per accesso in fibra ottica (per approfondimenti <https://www.telecomitalia.com/tit/it/notiziariotecnico/edizioni-2016/n-1-2016/capitolo-10.html>)
  - Accesso tramite reti wireless
    - 3G, 4G (LTE), 5G
  - Collegamento diretto

Es. collegamenti WAN dedicati ad alta velocità (aziende, università)

# Metriche di riferimento

# Metriche

- Come misurare le prestazioni della rete
- Ampiezza di banda e bitrate
- Throughput
- Latenza
- Perdita di pacchetti

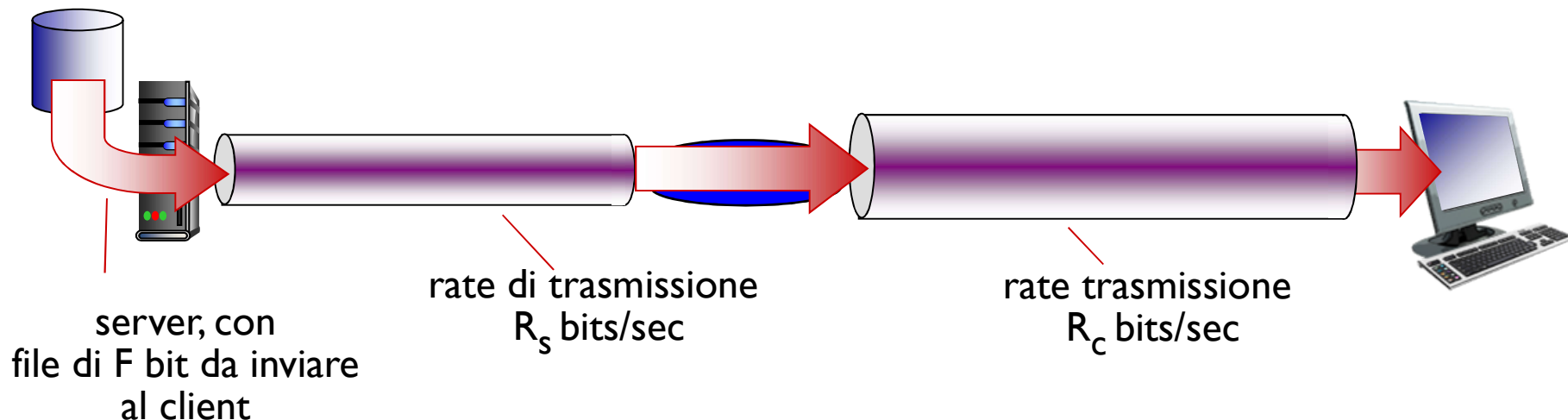


# Larghezza di banda e bit rate

- Larghezza di banda (Bandwidth)
  - larghezza dell'intervallo di frequenze utilizzato dal sistema trasmissivo. Si misura in Hertz (Hz)
- Velocità di trasmissione (bit rate o transmission rate)
  - quantità di dati (bits) che possono essere trasmessi (“inseriti nella linea”) nell'unità di tempo (bits/secondo or bps) su un certo collegamento
- N.B.
- Larghezza di banda e bit rate non sono la stessa cosa
- Bit rate dipende dalla larghezza di banda ma anche dalla tecnica trasmissiva usata (modulazione)

# Throughput

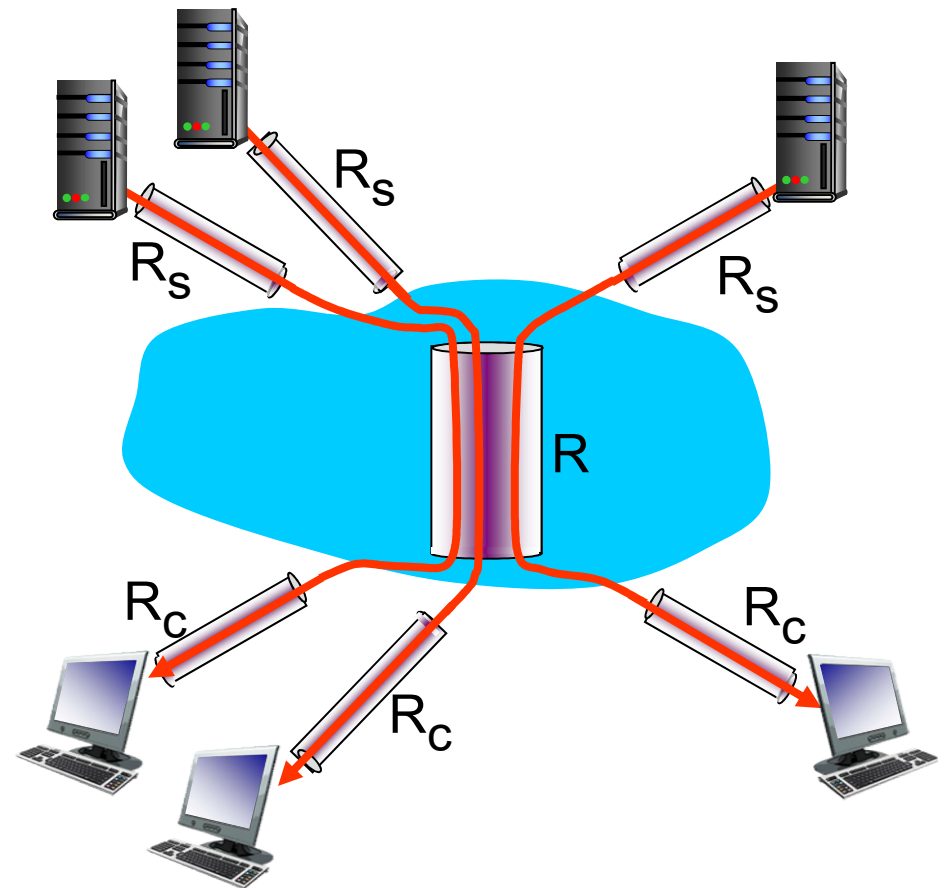
- Throughput
  - Quantità di dati che possono essere trasmessi da un nodo sorgente a un nodo destinazione in un certo intervallo di tempo
- bitrate e throughput non sono la stessa cosa.
- Throughput indica la velocità con cui trasferiamo i dati, al netto di perdite sulla rete, duplicazioni, protocolli, ecc.



$$\text{Throughput} = \min(R_s, R_c)$$

# Throughput: scenario Internet

- **end-end throughput** per connessione:  $\min(R_c, R_s, R/10)$
- in pratica spesso  $R_c$  or  $R_s$  sono il collo di bottiglia (rete di accesso)
- Il throughput dipende non solo dalla velocità di trasmissione del collegamento ma anche dalla quantità di dati (flussi di traffico aggiuntivi rispetto a quello di interesse)



10 connessioni sfruttano (equamente) il collegamento di backbone con rate  $R$  bits/sec

# Latenza (ritardo)

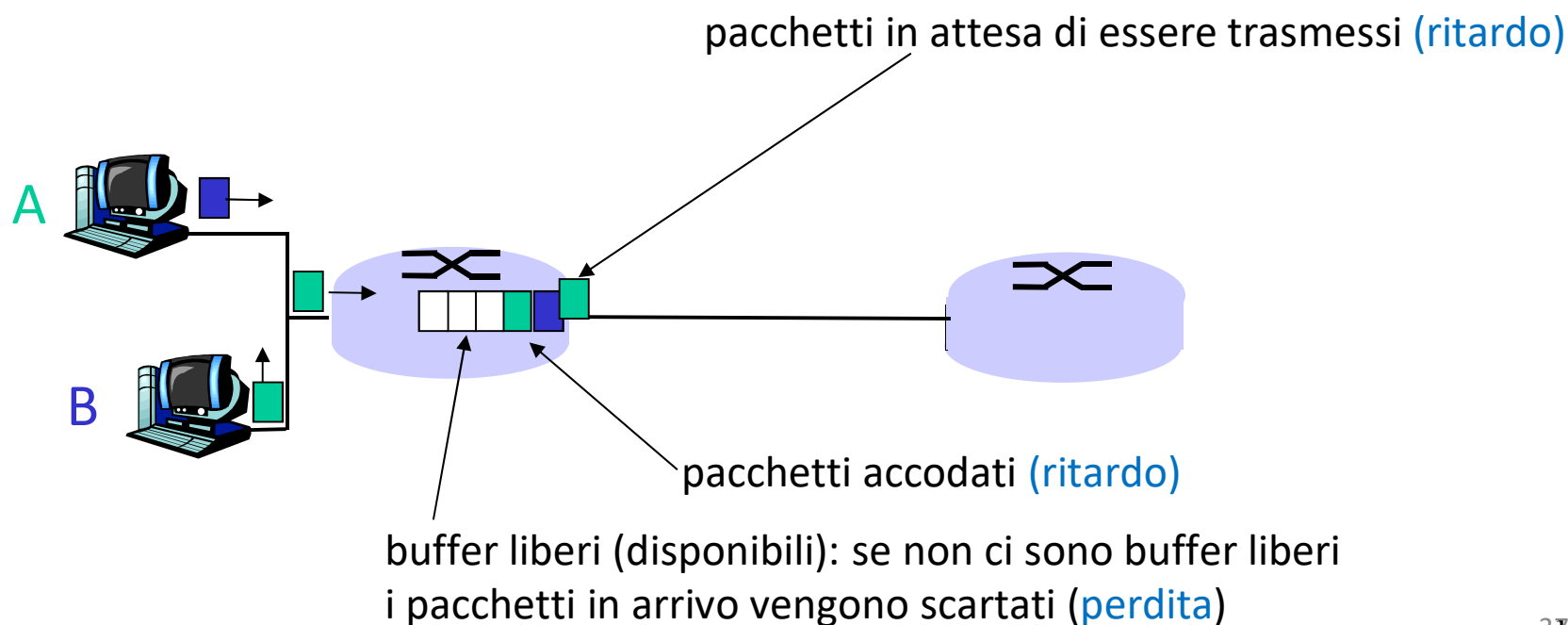
- Latenza: tempo richiesto affinché un messaggio arrivi a destinazione dal momento in cui il primo bit parte dalla sorgente

Latenza = ritardo di propagazione + ritardo di trasmissione +  
ritardo di accodamento + ritardo di elaborazione

# Come si verificano ritardi e perdite?

## I pacchetti *si accodano* nei buffer dei router

- il tasso di arrivo dei pacchetti sul collegamento eccede la capacità del collegamento in uscita di evaderli
- i pacchetti si accodano, in attesa del proprio turno



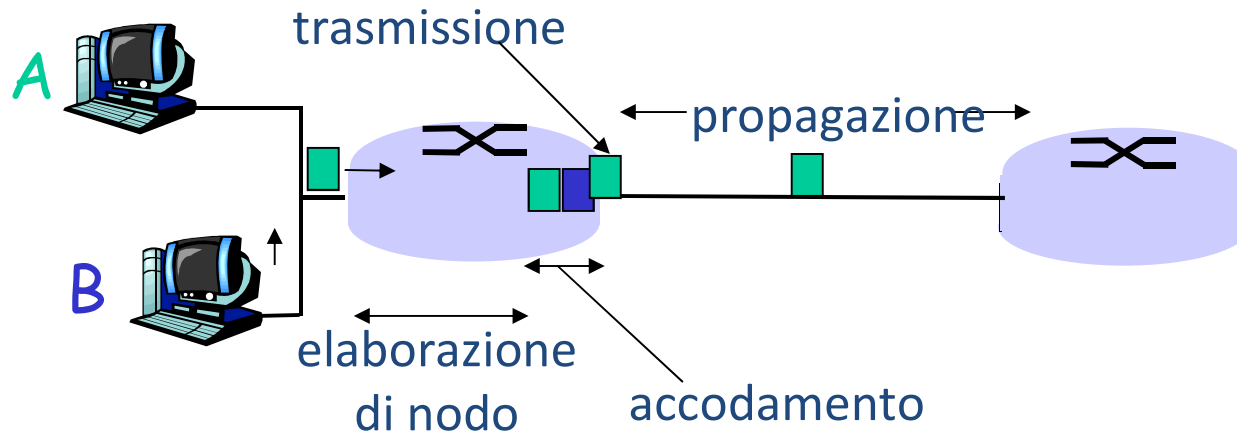
# Quattro cause di ritardo per i pacchetti

## 1. Ritardo di elaborazione del nodo

- controllo errori sui bit
- determinazione del canale di uscita

## 2. Ritardo di accodamento

- attesa di trasmissione
- Dipende da intensità e tipo di traffico (che influiscono sul numero di pacchetti in coda nel buffer)



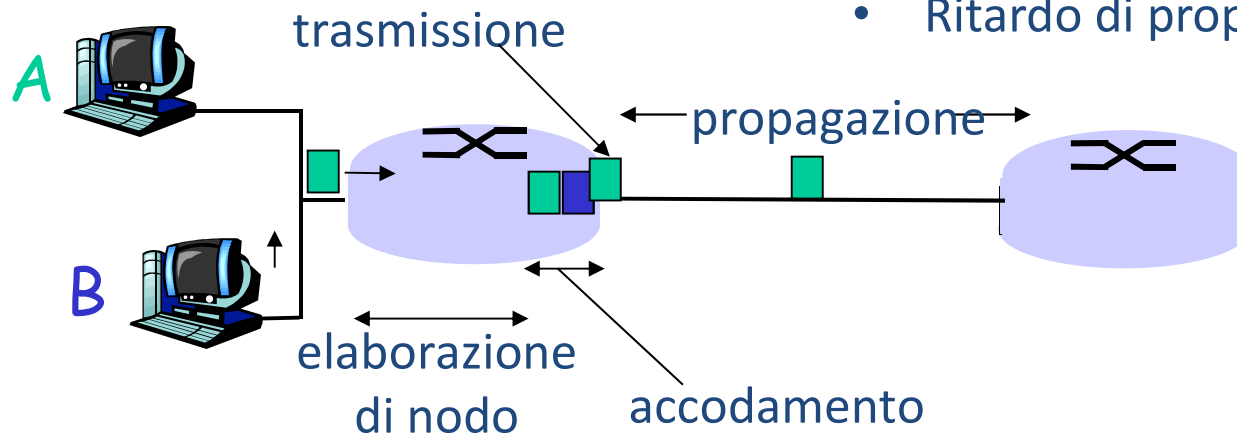
# Ritardo nelle reti a commutazione di pacchetto

## 3. Ritardo di trasmissione ( $L/R$ )

- Tempo impiegato per trasmettere un pacchetto sul link
- $R$  = rate (velocità) di trasmissione del collegamento (in bps)
- $L$  = lunghezza del pacchetto (in bit)
- Ritardo di trasmissione =  $L/R$

## 4. Ritardo di propagazione ( $d/s$ )

- Tempo impiegato da 1 bit per essere propagato da un nodo all'altro
- $d$  = lunghezza del collegamento fisico
- $s$  = velocità di propagazione del mezzo ( $\sim 3 \cdot 10^8$  m/sec)
- Ritardo di propagazione =  $d/s$



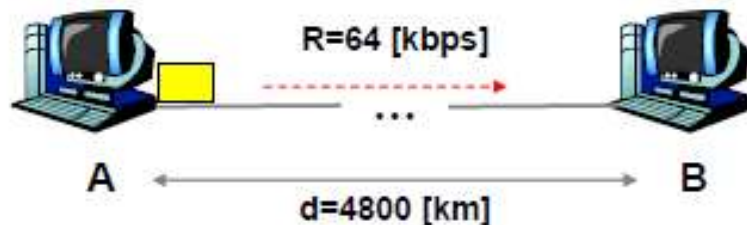
# Esempio

- Invio di 1 file di 1 Mbit su un datalink 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

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

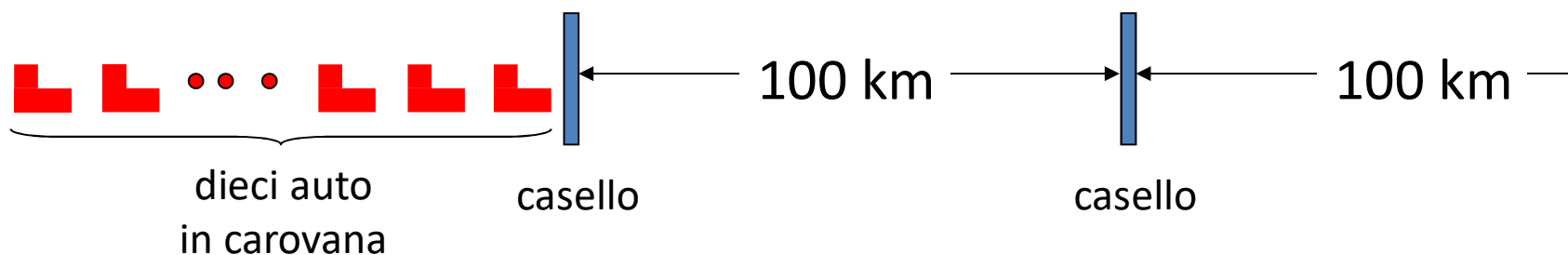


- Velocità di trasmissione 1 Gbps

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

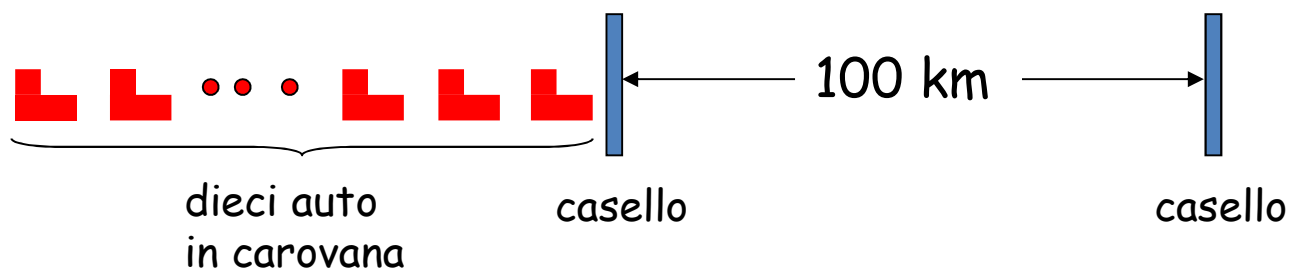


# L'analogia del casello autostradale



- Le automobili viaggiano (ossia “si propagano”) alla velocità di 100 km/h
- Il casello fa transitare (ossia “trasmette”) un’auto ogni 12 secondi
- D: auto~bit; carovana ~ pacchetto
- Quanto tempo occorre perché le 10 auto in carovana si trovino di fronte al secondo casello?
- Ipotesi: la prima auto che arriva al casello attende le altre nove

# L'analogia del casello autostradale



- Le auto ora “si propagano” alla velocità di 1000 km/h
- Al casello adesso occorre 1 min per servire ciascuna auto
- **D: le prime auto arriveranno al secondo casello prima che le ultime auto della carovana lascino il primo?**

# Ricapitolando...

- **Ritardo di propagazione:** tempo che serve a un bit per viaggiare da un punto A a un punto B sul mezzo trasmissivo. Dipende dalla distanza (valori tipici da pochi microsecondi a centinaia di millisecondi)

$$\text{Ritardo}_{pr} = \text{distanza} / \text{velocità}_{propagazione}$$

- **Ritardo di trasmissione:** tempo necessario per immettere un pacchetto sulla linea

$$\text{Ritardo}_{tr} = \text{lunghezza del pacchetto} / \text{rate}_{trasmissione}$$

- **Ritardo di accodamento:** tempo in cui il pacchetto attende nella coda del router (dipende dalla congestione)
- **Ritardo di elaborazione:** tempo per l'elaborazione al nodo intermedio (in genere pochi microsecondi, o anche meno)

$$\text{Ritardo}_{nodo} = \text{Ritardo}_{el} + \text{Ritardo}_{acc} + \text{Ritardo}_{tr} + \text{Ritardo}_{pr}$$

# Ritardo end-to-end

Ipotizzando che ci siano  $N-1$  router tra origine e destinazione e che siano trascurabili ritardi di congestione, che il ritardo di elaborazione ai router e al nodo mittente sia  $\text{Ritardo}_{el}$ , il ritardo di trasmissione sia  $\text{Ritardo}_{tr}$  e il ritardo di propagazione su ciascun collegamento valga  $\text{Ritardo}_{pr}$

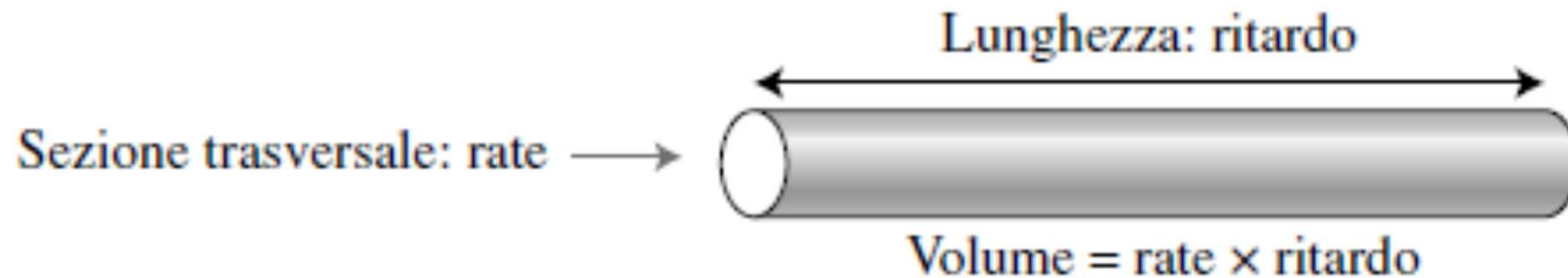
$$\text{Ritardo}_{nodo} = \text{Ritardo}_{el} + \text{Ritardo}_{tr} + \text{Ritardo}_{pr}$$

$$\text{Ritardo}_{end-to-end} = N * \text{Ritardo}_{nodo}$$

nel caso generale di ritardi eterogeni -> sommatoria)

$$\text{Ritardo}_{end-to-end} = \text{Ritardo}_{nodo1} + \text{Ritardo}_{nodo2} + \dots + \text{Ritardo}_{nodoN}$$

# Prodotto rate-ritardo



- Possiamo pensare al link tra due punti come a un tubo.
- La sezione trasversale del tubo rappresenta il rate e la lunghezza rappresenta il ritardo.
- Possiamo dire che il volume del tubo definisce il prodotto rate-ritardo
- Prodotto rate-ritardo: numero massimo di bit che il link può contenere

# Esercizio

- Calcolare il ritardo end-to-end di un pacchetto su un percorso da A a B con due router, supponendo trascurabili il ritardo di congestione e il ritardo di processing, e supponendo che il propagation delay ( $d_{\text{propagation}}$ ) e transmission delay ( $d_{\text{transmission}}$ ) sui link siano uguali per tutti i nodi.



# Ricapitolando

- Definizione di Rete
- LAN
- WAN
- Commutazione di circuito vs commutazione di pacchetti
- Internet (internetwork)
- Metriche di riferimento