

Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"
Laurea in Informatica

Sistemi Operativi e Reti
(modulo Reti)
a.a. 2023/2024

Introduzione (parte2)

dr. Manuel Fiorelli

manuel.fiorelli@uniroma2.it

<https://art.uniroma2.it/fiorelli>

Basate sulle slide del libro di testo:

https://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/ppt.php

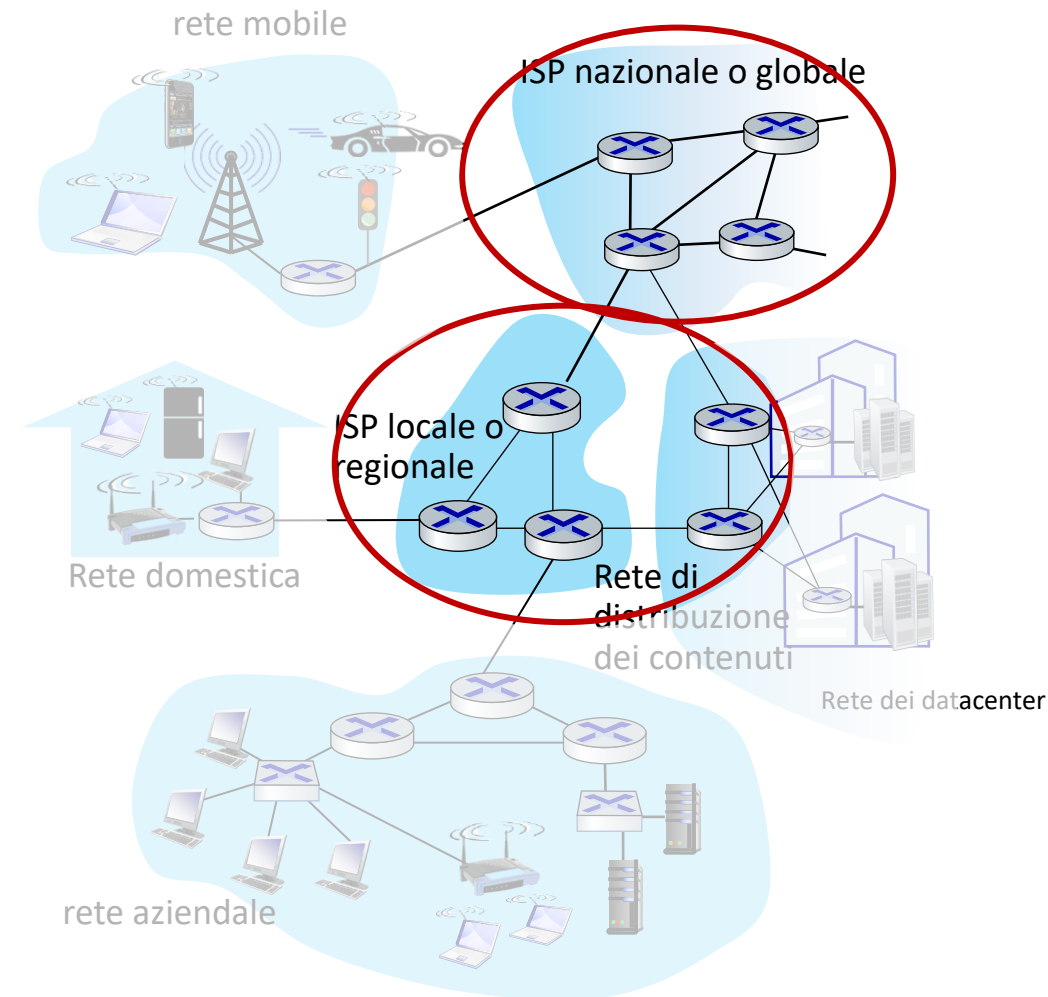
Capitolo 1: tabella di marcia

- Cos'è Internet?
- Cos'è un protocollo?
- Ai confini della rete: host, reti di accesso, mezzi trasmissivi
- **Il nucleo della rete:** commutazione di pacchetto e commutazione di circuito, struttura di Internet
- Prestazioni: perdite, ritardi, throughput
- Sicurezza
- Livelli di protocollo, modelli di servizio
- Un po' di storia



Il nucleo della rete

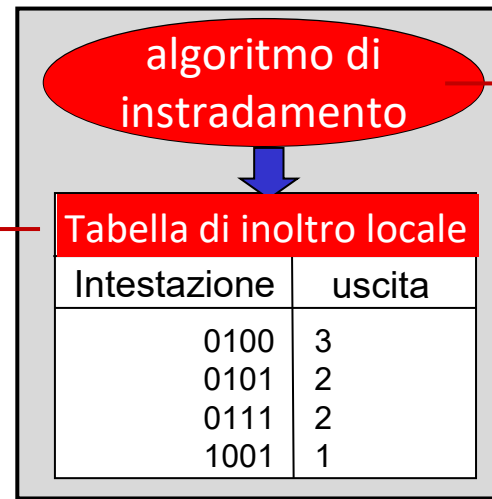
- una maglia (mesh) di commutatori di pacchetti e collegamenti che interconnettono i sistemi periferici di Internet
- **commutazione di pacchetto (packet-switching)**: i sistemi periferici suddividono i messaggi di livello applicativo in **pacchetti (packets)**
 - la rete **inoltra (forwards)** i pacchetti da un router al successivo attraverso i collegamenti (*links*), lungo un **percorso (path o route)** dalla sorgente alla destinazione



Due funzioni chiave del nucleo della rete

Inoltro (forwarding):

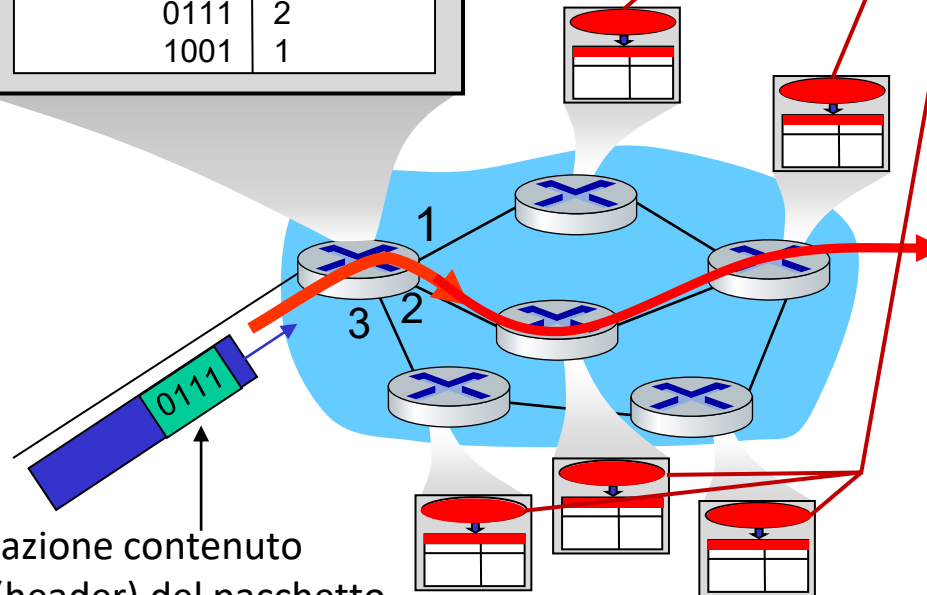
- o “switching”
- **azione locale:** sposta i pacchetti in arrivo al collegamento di ingresso del router al collegamento di uscita appropriato



Instradamento (routing):

- azione **globale:** determina i percorsi presi dai pacchetti dalla sorgente alla destinazione
- algoritmi di instradamento

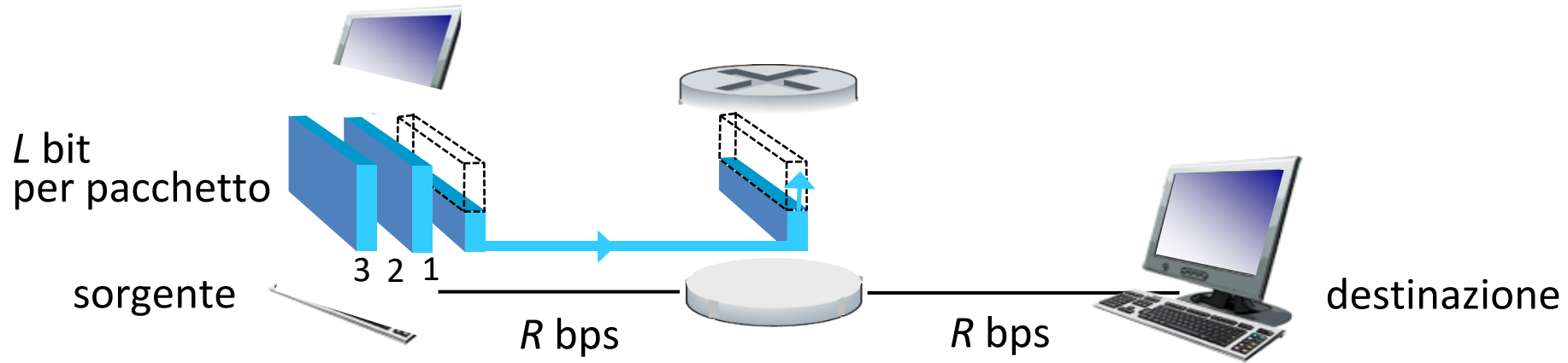
indirizzo di destinazione contenuto nell'intestazione (header) del pacchetto in arrivo







Commutazione di pacchetto: store-and-forward



- **ritardo (delay) di trasmissione:** servono L/R secondi per trasmettere (transmit) pacchetti di L bit attraverso un collegamento a R bps
- **store and forward:** il router deve aver ricevuto l'intero pacchetto prima di poter cominciare a trasmettere sul collegamento in uscita

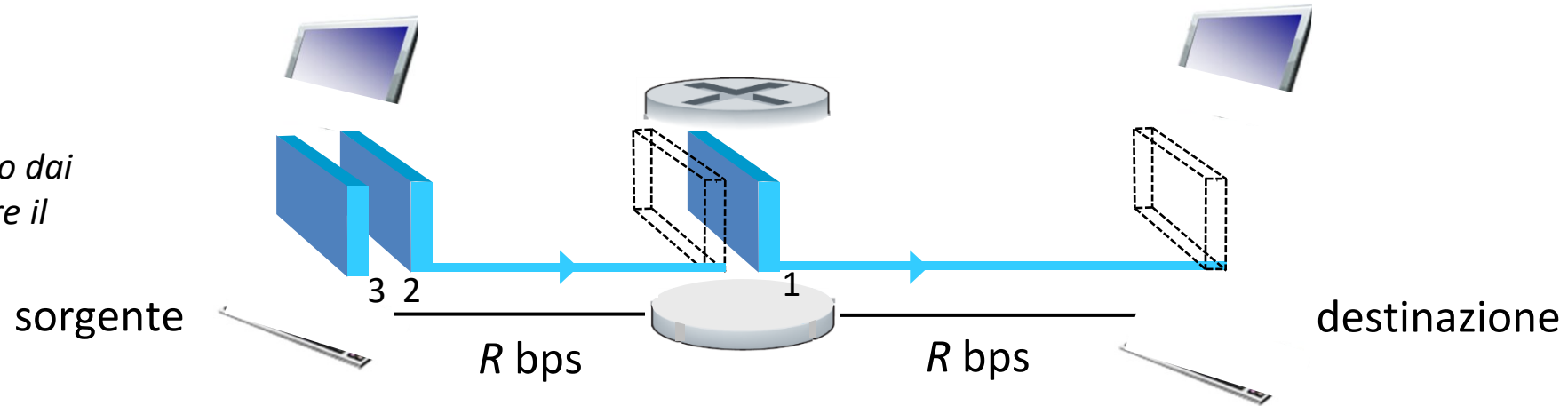
Esempio numerico "one-hop":

- $L = 10$ kbit
- $R = 100$ Mbps
- Ritardo di trasmissione "one-hop"
$$= \frac{10 \text{ kbit}}{100 \text{ Mbps}} = \frac{10 \cdot 10^3 \text{ bit}}{100 \cdot 10^6 \frac{\text{bit}}{\text{s}}} = 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 0.1 \text{ ms}$$

Commutazione di pacchetto: store-and-forward (cont.)

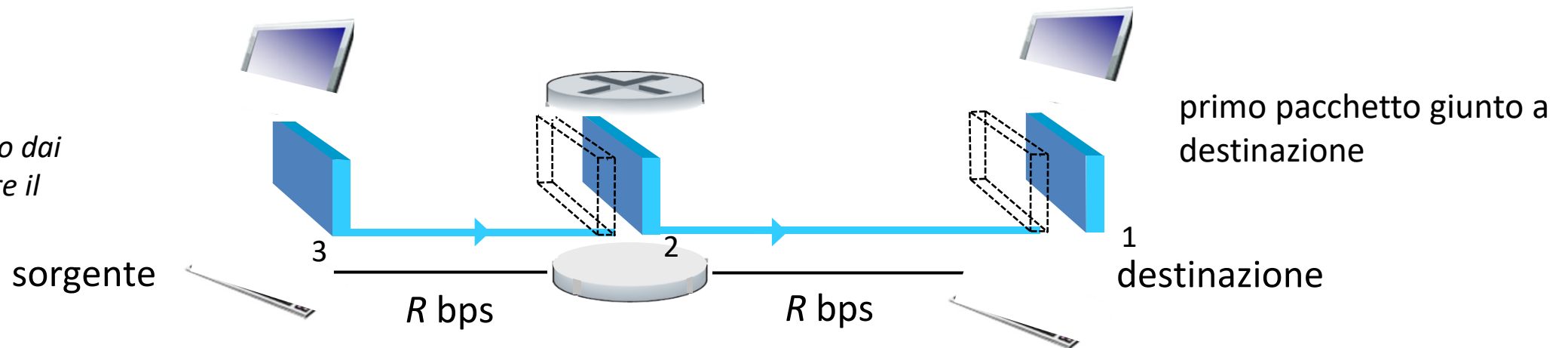
$$T = L/R$$

Trascurando il tempo impiegato dai bit a attraversare il collegamento



$$T = 2L/R$$

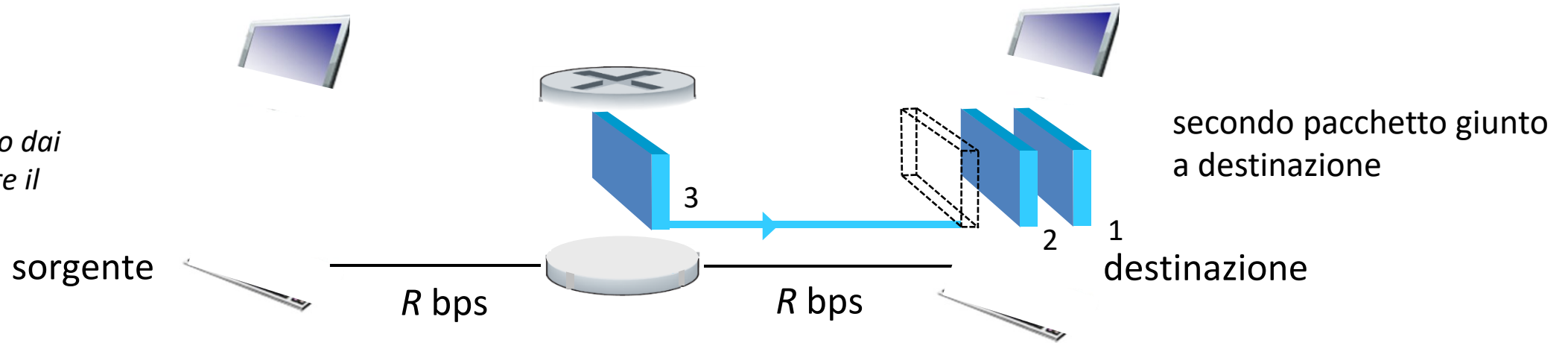
Trascurando il tempo impiegato dai bit a attraversare il collegamento



Commutazione di pacchetto: store-and-forward (cont.)

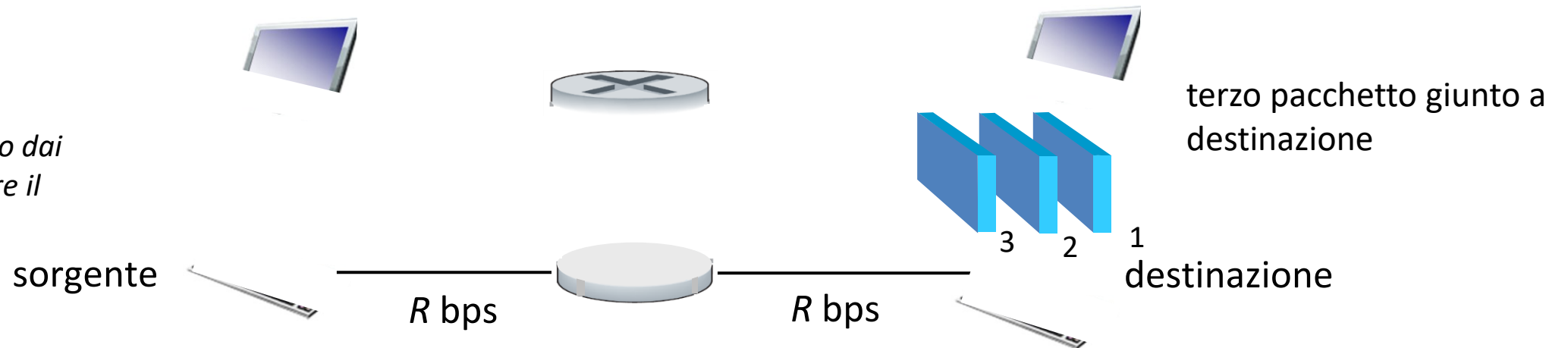
$$T = 3L/R$$

Trascurando il
tempo impiegato dai
bit a attraversare il
collegamento



$$T = 4L/R$$

Trascurando il
tempo impiegato dai
bit a attraversare il
collegamento



Commutazione di pacchetto: store-and-forward (cont.)

Ritardo da un capo all'altro (end-to-end) per la trasmissione di 1 pacchetto su un percorso di N collegamenti di pari velocità R:

$$d_{end-to-end} = N \frac{L}{R}$$

Trascurando il ritardo di propagazione e altre forme di ritardo.

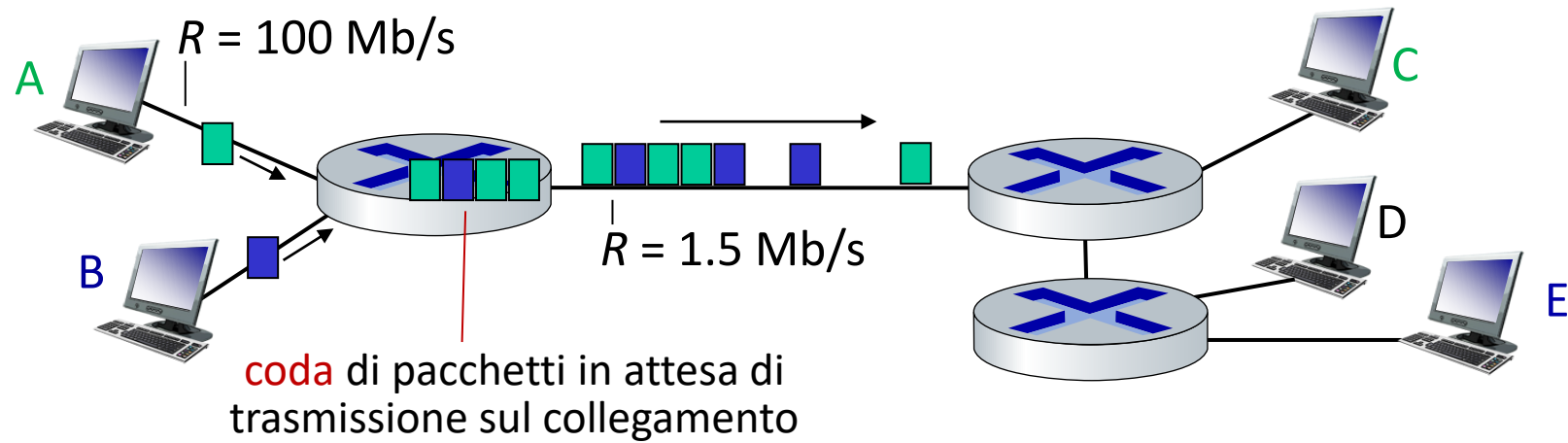
Commutazione di pacchetto: store-and-forward (cont.)

Ritardo da un capo all'altro (end-to-end) per la trasmissione di P pacchetto su un percorso di N collegamenti di pari velocità R :

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

Trascurando il ritardo di propagazione e altre forme di ritardo.

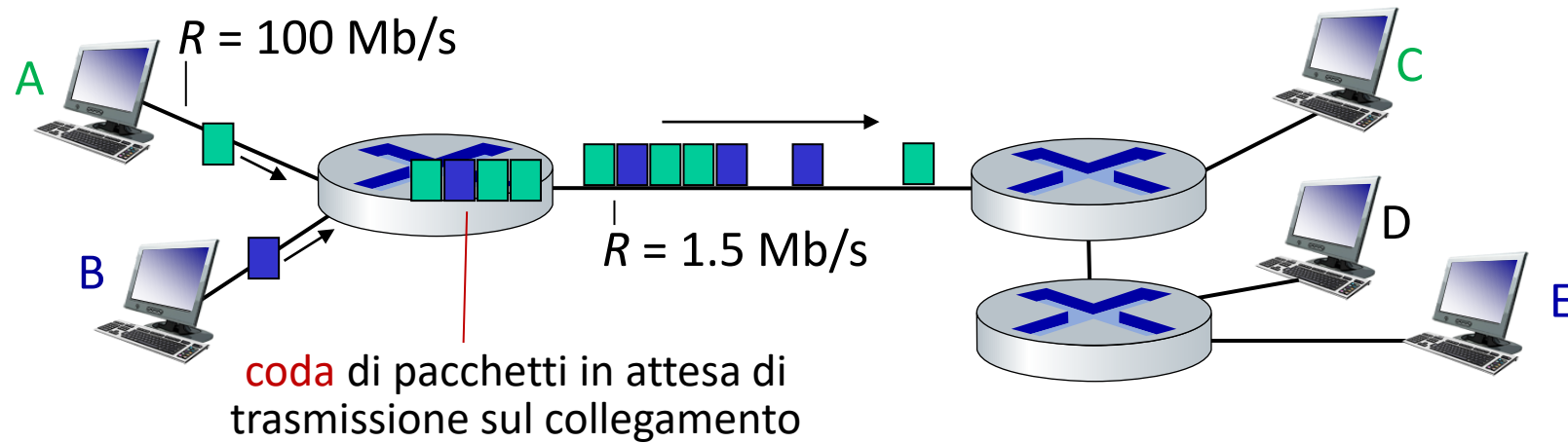
Commutazione di pacchetto: accodamento



L'**accodamento** (*queuing*) si verifica quando il lavoro arriva più velocemente di quanto possa essere servito:



Commutazione di pacchetto: accodamento



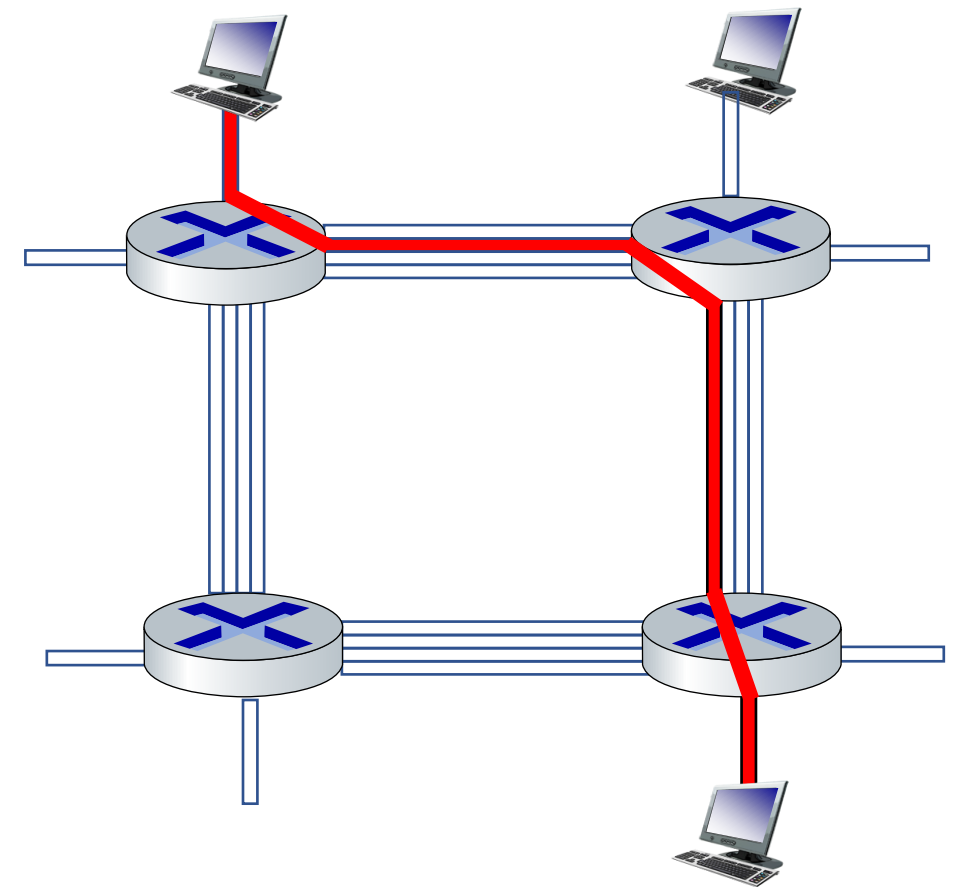
Accodamento dei pacchetti e perdite: se il tasso di arrivo (arrival rate) (in bps) al collegamento eccede il tasso di trasmissione (bps) del collegamento per un certo periodo di tempo:

- i pacchetti si accodano in attesa di essere trasmessi sul collegamento in uscita
- i pacchetti possono essere scartati (persi) se la memoria (buffer) si riempie

Alternativa alla commutazione di pacchetto: commutazione di circuito

le risorse richieste lungo un percorso (buffer e velocità di trasmissione sui collegamenti) per consentire la comunicazione tra sistemi periferici sono riservate per l'intera durata della sessione di comunicazione

- risorse dedicate: nessuna condivisione
 - trasferimento dati a velocità costante e *garantita*
- i segmenti del circuito restano inattivi se non utilizzati (*nessuna condivisione*)
- usato comunemente nella rete telefonica tradizionale



* Check out the online interactive exercises for more examples: http://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/interactive

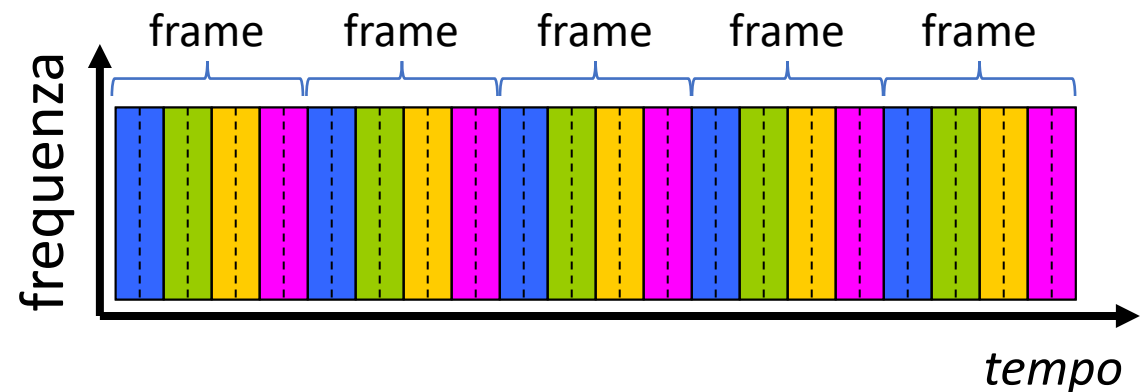
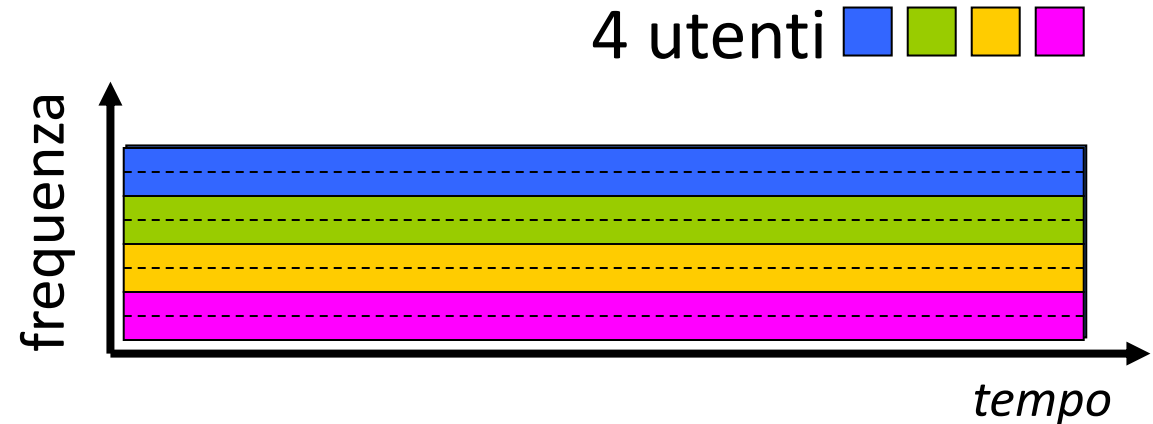
Commutazione di circuito: FDM e TDM

Multiplexing a Divisione di Frequenza (Frequency Division Multiplexing (FDM))

- spettro di frequenza di un collegamento suddiviso in bande (*band*)
- ogni circuito ha una propria banda, può trasmettere alla velocità massima di quella banda ristretta.

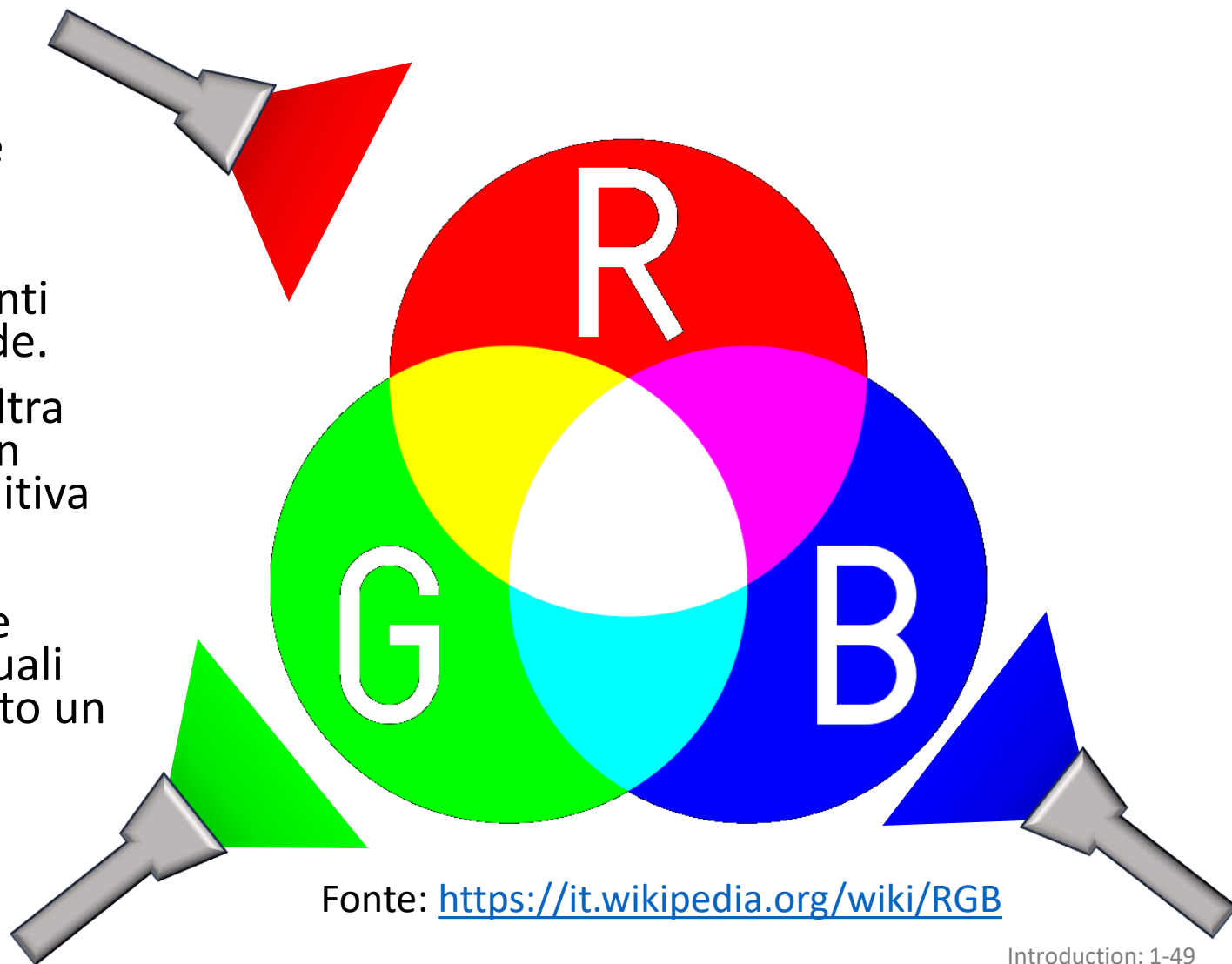
Multiplexing a Divisione di Tempo (Time Division Multiplexing (TDM))

- tempo suddiviso *frame* di durata fissa, ripartiti in un numero fisso di *slot*
- ciascun circuito riceve slot periodici, può trasmettere alla massima velocità della banda di frequenza (più ampia) solo nei propri slot temporali



FDM: intuizione

- La luce (visibile) è un'onda elettromagnetica, la cui frequenza è connessa al colore che vediamo
- Supponiamo di trasmettere su una stessa fibra ottica impulsi con sorgenti *sincronizzate* a luce blu, rossa e verde.
- Il segnale combinato osservato all'altra estremità della fibra ci apparirà di un colore determinato dalla sintesi additiva dei colori degli impulsi trasmessi. Tuttavia, facendo riferimento allo schema a destra, potremmo sempre risalire in maniera non ambigua a quali sorgenti hanno effettivamente inviato un impulso.

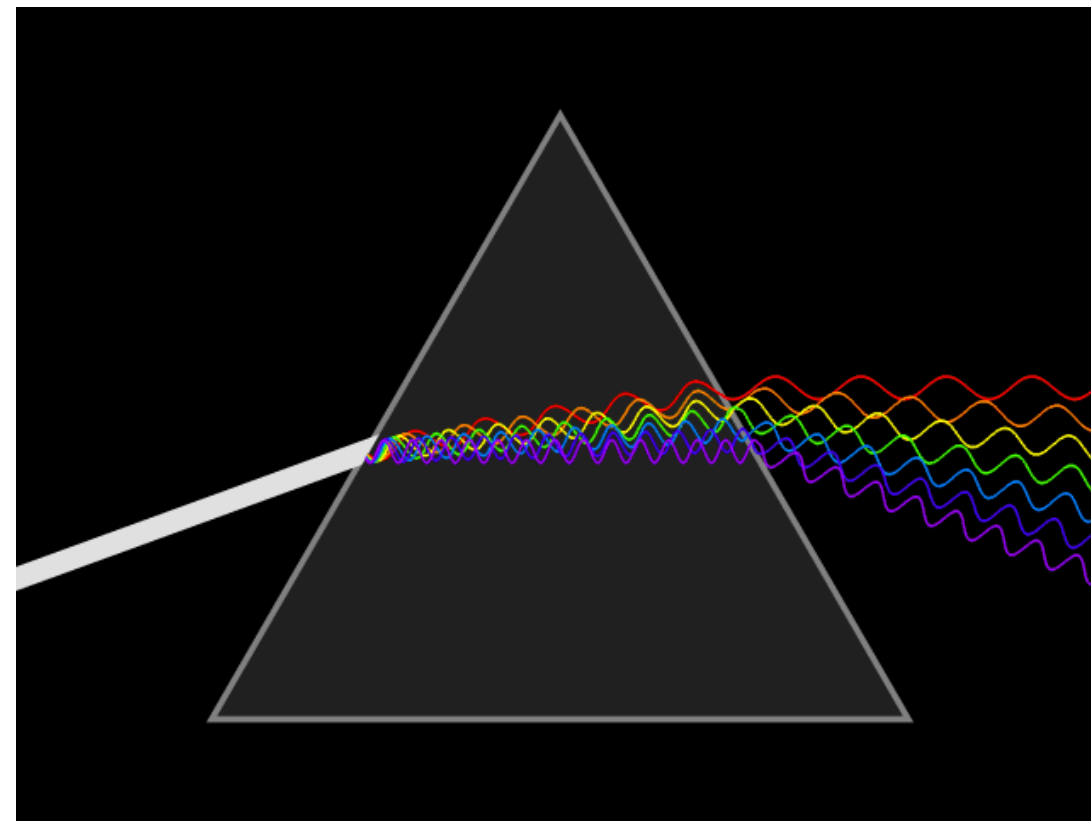


Fonte: <https://it.wikipedia.org/wiki/RGB>

FDM: intuizione (cont.)

Newton dimostrò che un prisma può scomporre la luce bianca in uno spettro di colori, mentre una lente convergente e un secondo prisma possono ricomporre lo spettro in luce bianca.

Questo suggerisce un modo per combinare sorgenti luminose a frequenze diverse in un unico segnale, che può poi essere suddiviso nuovamente nelle sue componenti originali.

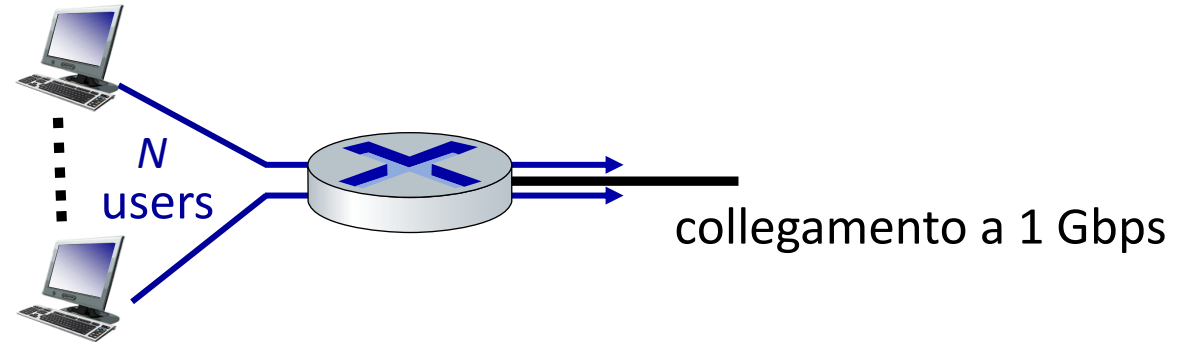


Fonte: https://it.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton

Commutazione di pacchetto vs commutazione di circuito

Esempio:

- collegamento a 1 Gb/s
- ogni utente:
 - 100 Mb/s quando “attivo”
 - attivo per il 10% del tempo



D: quanti utenti possono usare questa rete sotto la commutazione di circuito e sotto la commutazione di pacchetto?

■ **Commutazione di circuito:** 10 utenti

■ **Commutazione di pacchetto:**
con 35 utenti, probabilità > 10 attivi
allo stesso tempo è meno di .0004 *

Ovvero, in Excel:

=1 - DISTRIB.BINOM.N(10;35;0.1;VERO)

D: come abbiamo ottenuto 0.0004?

R: $P(\text{utenti attivi} > 10) = 1 - P(\text{utenti attivi} \leq 10)$

$$= 1 - \sum_{i=0}^{10} P(\text{utenti attivi} = i) = 1 - \sum_{i=0}^{10} \binom{35}{i} 0.1^i (1 - 0.1)^{35-i} =$$

$$= 1 - \sum_{i=0}^{10} \frac{35!}{i! (35-i)!} 0.1^i (1 - 0.1)^{35-i} \leq 0.0004$$

fonte: https://it.wikipedia.org/wiki/Distribuzione_binomiale

* Check out the online interactive exercises for more examples: http://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/interactive

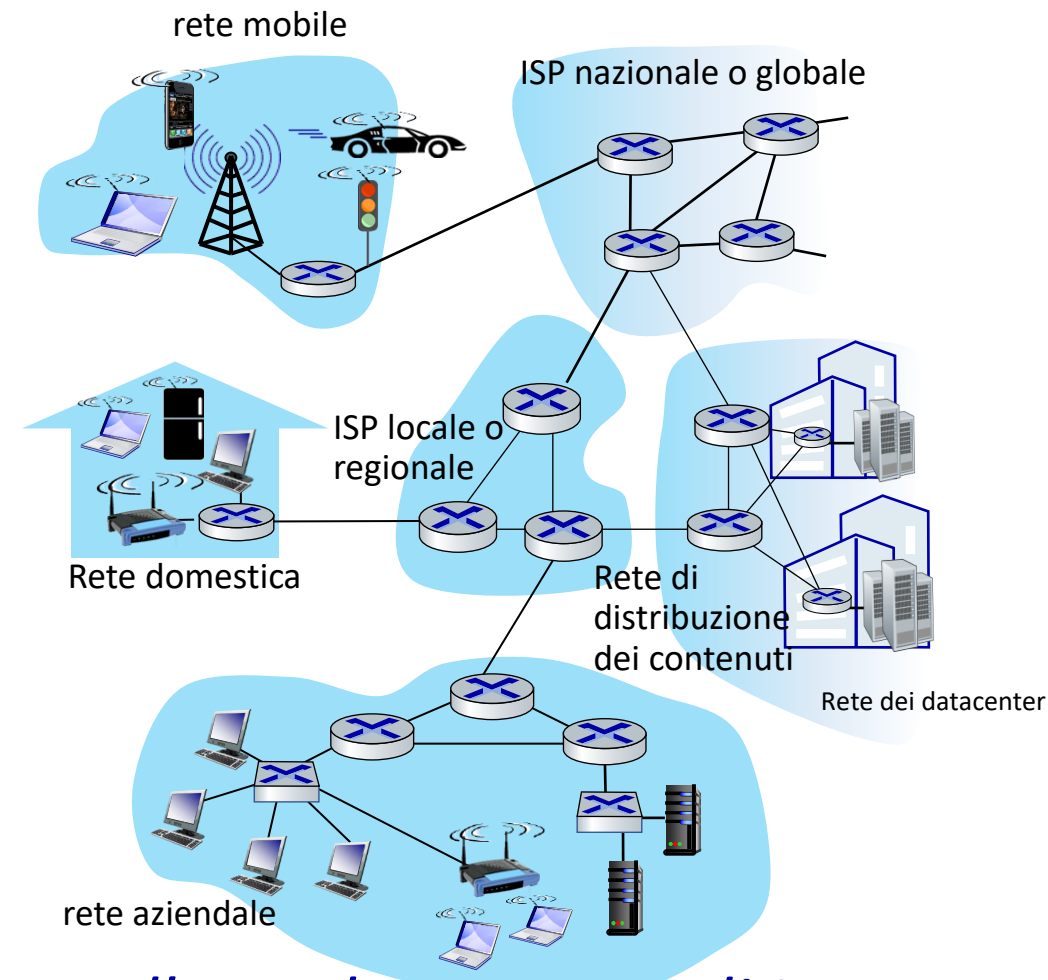
Commutazione di pacchetto vs commutazione di circuito

La commutazione di pacchetto è una "vincitrice assoluta"?

- ottimo per i dati a "raffica" - a volte ha dati da inviare, ma altre volte no (condivisione delle risorse, assegnazione delle risorse su richiesta)
 - più semplice, non necessita l'impostazione della chiamata (né di mantenere le informazioni sui circuiti su tutti i router).
- **eccessiva congestione**: ritardo e perdita di pacchetti in caso di buffer overflow
 - sono necessari protocolli per il trasferimento affidabile dei dati e per il controllo della congestione
- **ritardi end-to-end variabili e imprevedibili**: a causa della variabilità e imprevedibilità dei ritardi di accodamento
 - servizi in tempo reale (come la telefonia e la videoconferenza)

Struttura di Internet: una “rete di reti”

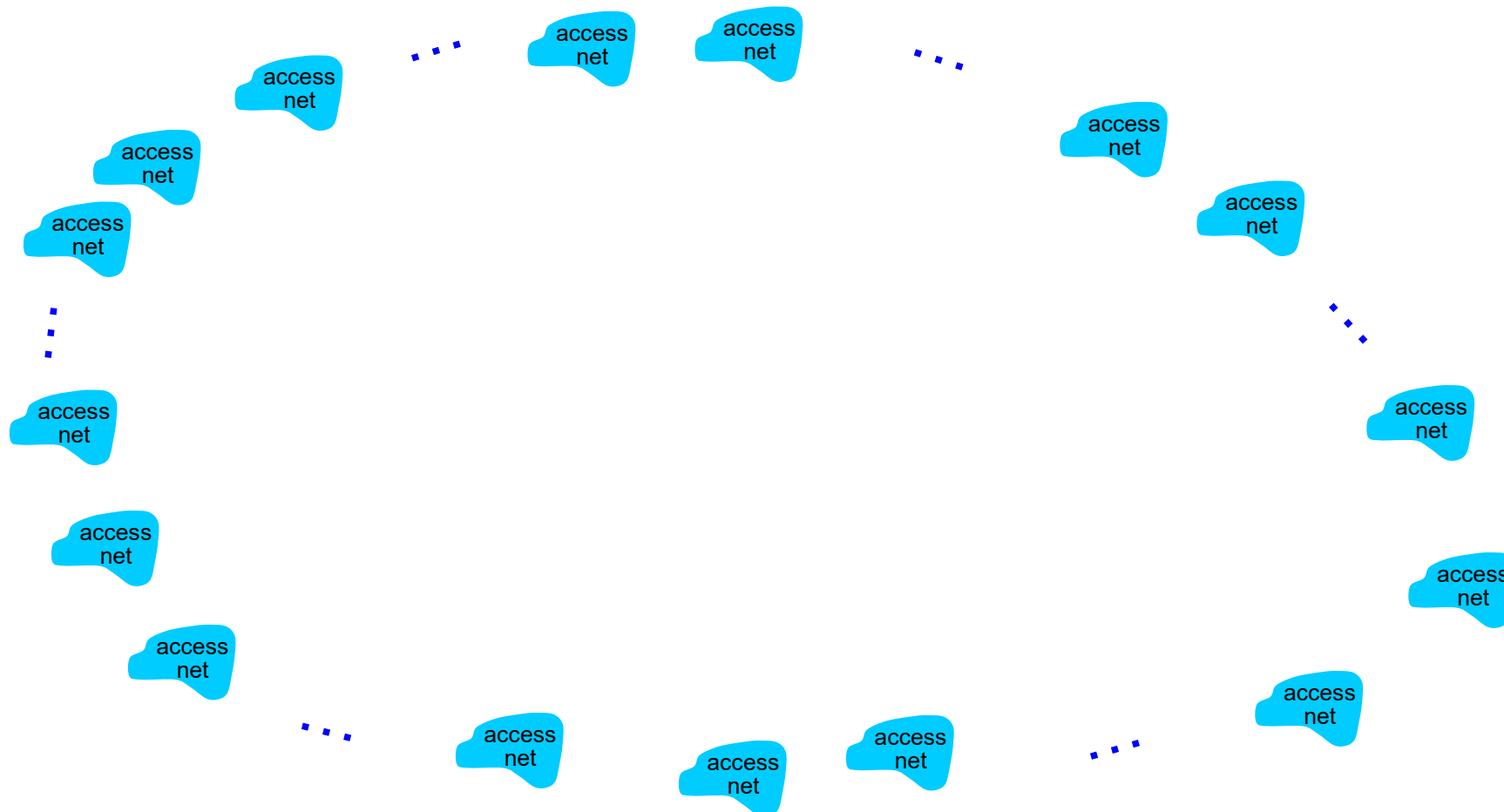
- i sistemi periferici accedono a Internet tramite i cosiddetti Internet Service Provider (ISP) di **accesso**
- gli ISP di accesso devono essere interconnessi a loro volta
 - in modo che due host qualsiasi (ovunque!) possano inviare pacchetti l'uno all'altro
- la rete di reti risultante è molto complessa
 - evoluzione guidata da **economia**, **politiche nazionali**



Seguiamo un approccio graduale per descrivere l'attuale struttura di Internet

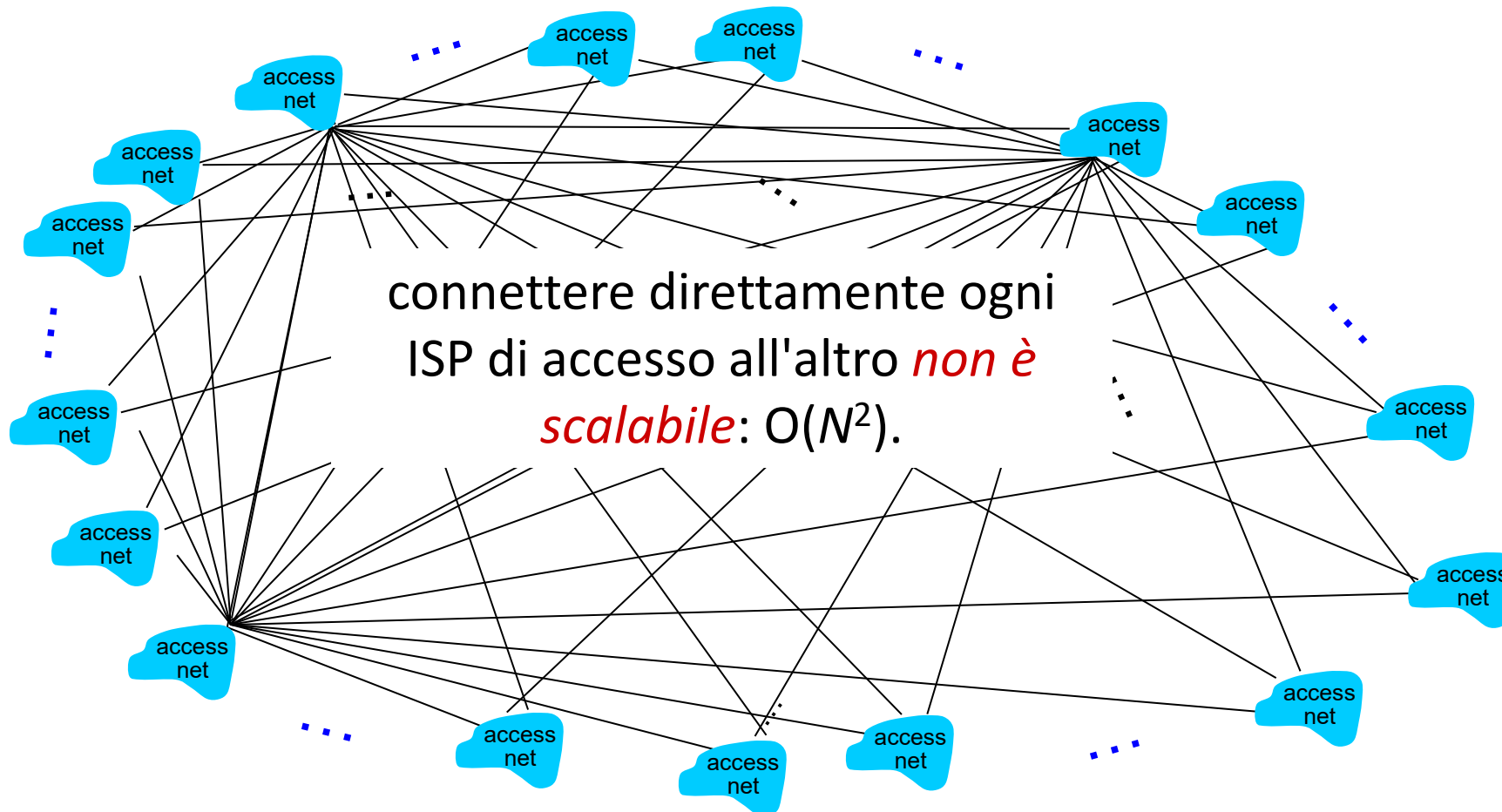
Struttura di Internet: una “rete di reti”

Domanda: dati *milioni* di ISP di accesso, come collegarli tra loro?



Struttura di Internet: una “rete di reti”

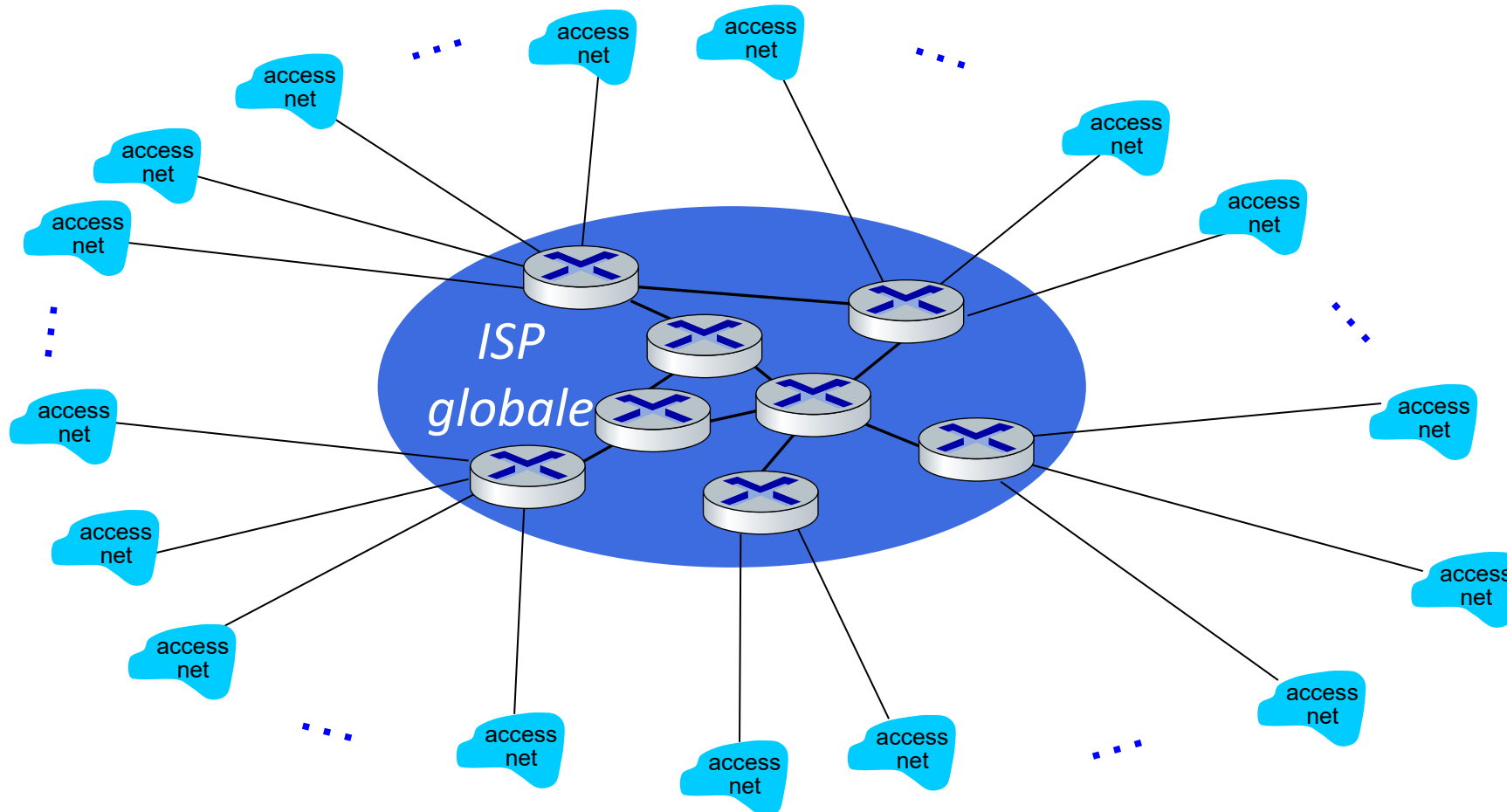
Domanda: dati *milioni* di ISP di accesso, come collegarli tra loro?



Struttura di Internet: una “rete di reti”

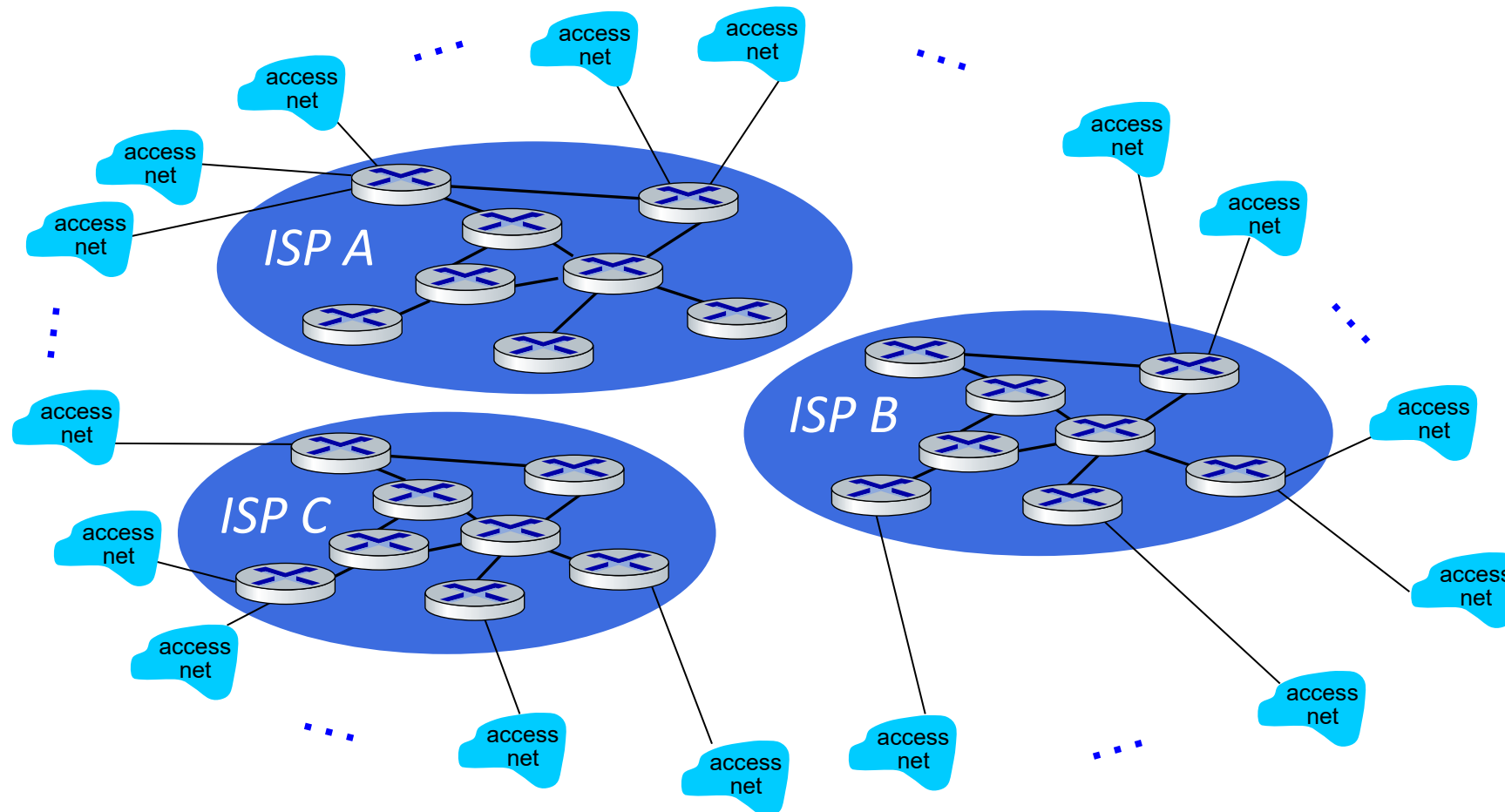
Opzione: collegare ogni ISP di accesso a un ISP globale di transito?

ISP cliente (customer) e ISP (fornitore) hanno un accordo economico



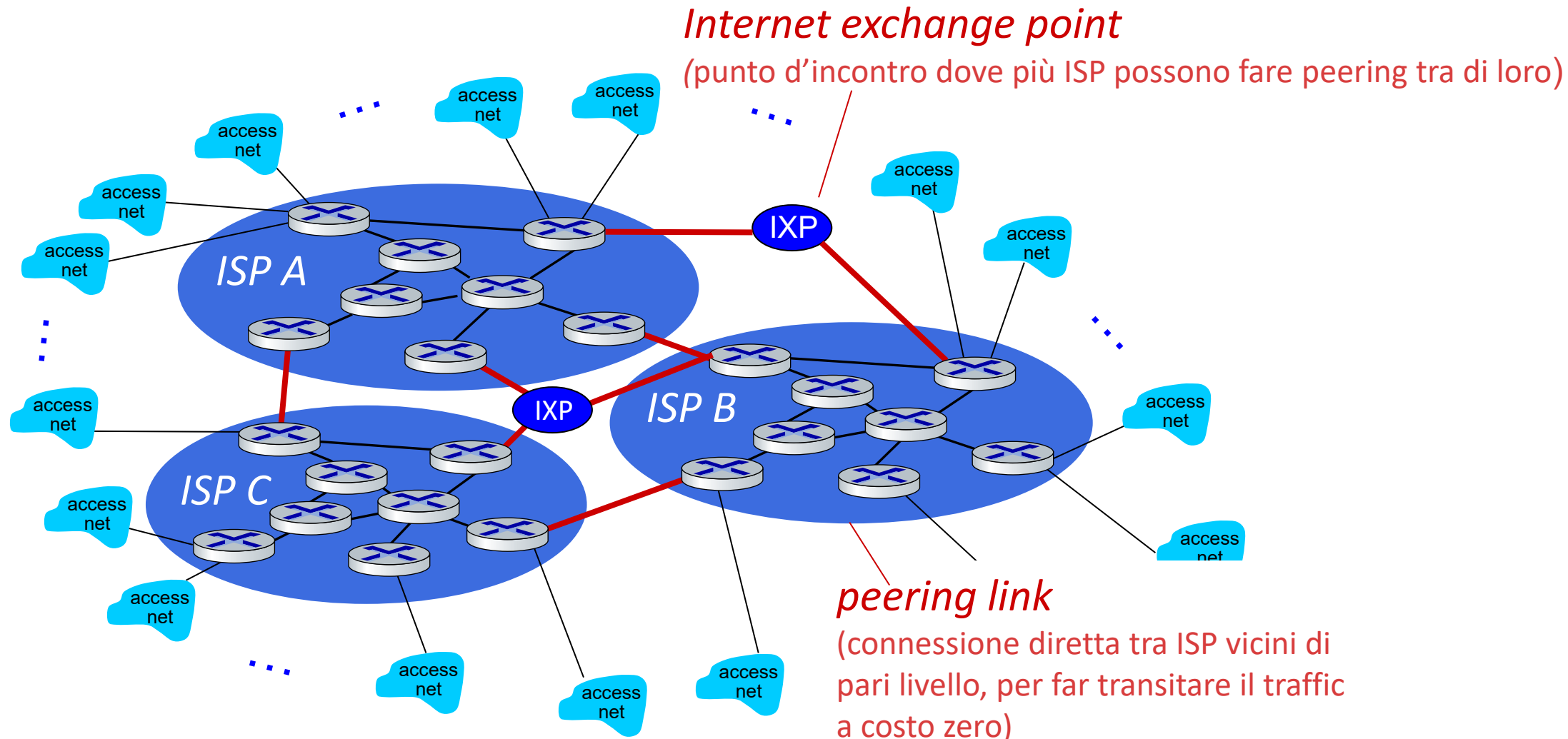
Struttura di Internet: una “rete di reti”

Ma se un ISP globale è un'attività vantaggiosa, ci saranno concorrenti



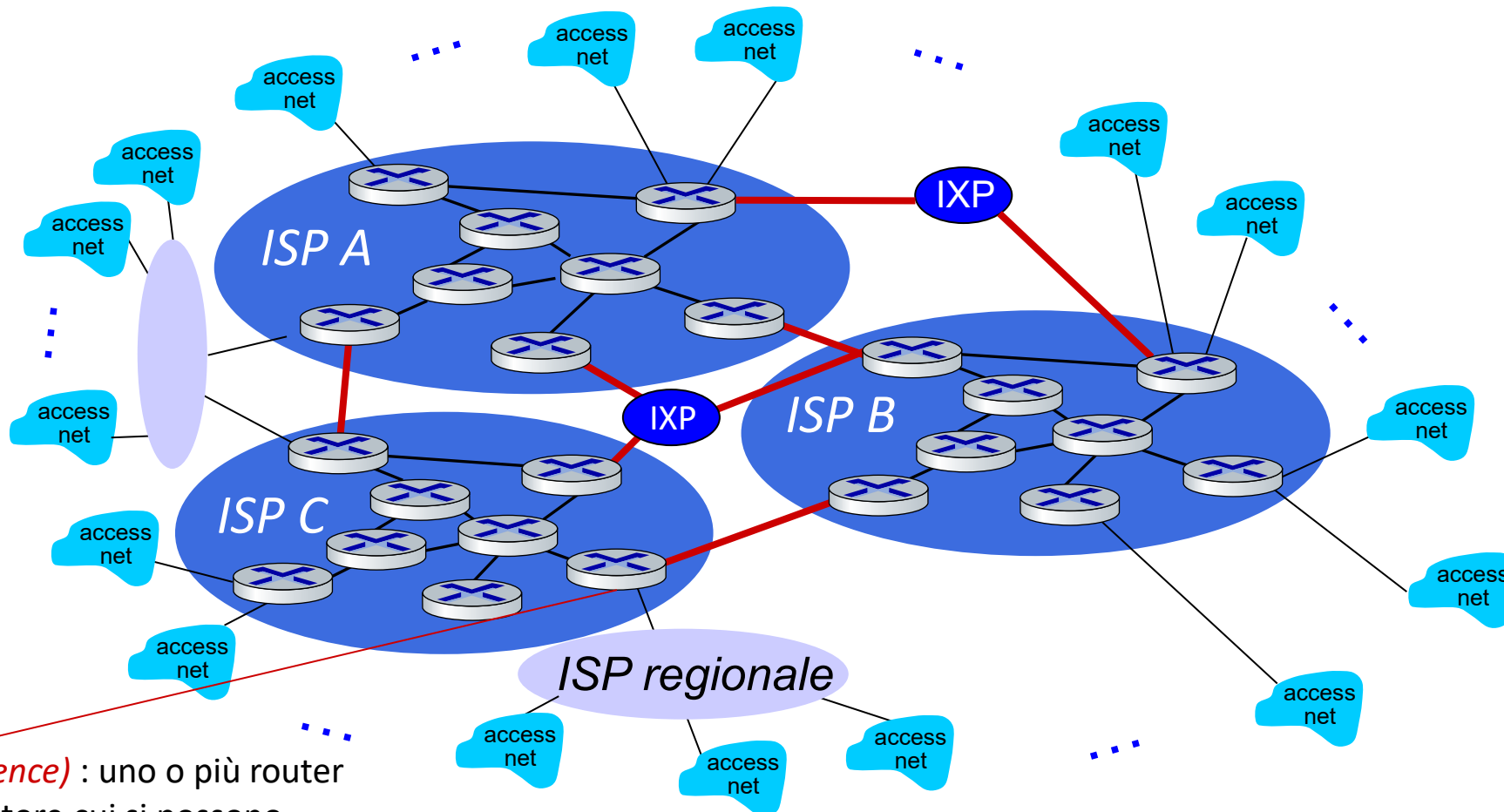
Struttura di Internet: una “rete di reti”

Ma se un ISP globale è un'attività vantaggiosa, ci saranno concorrenti



Struttura di Internet: una “rete di reti”

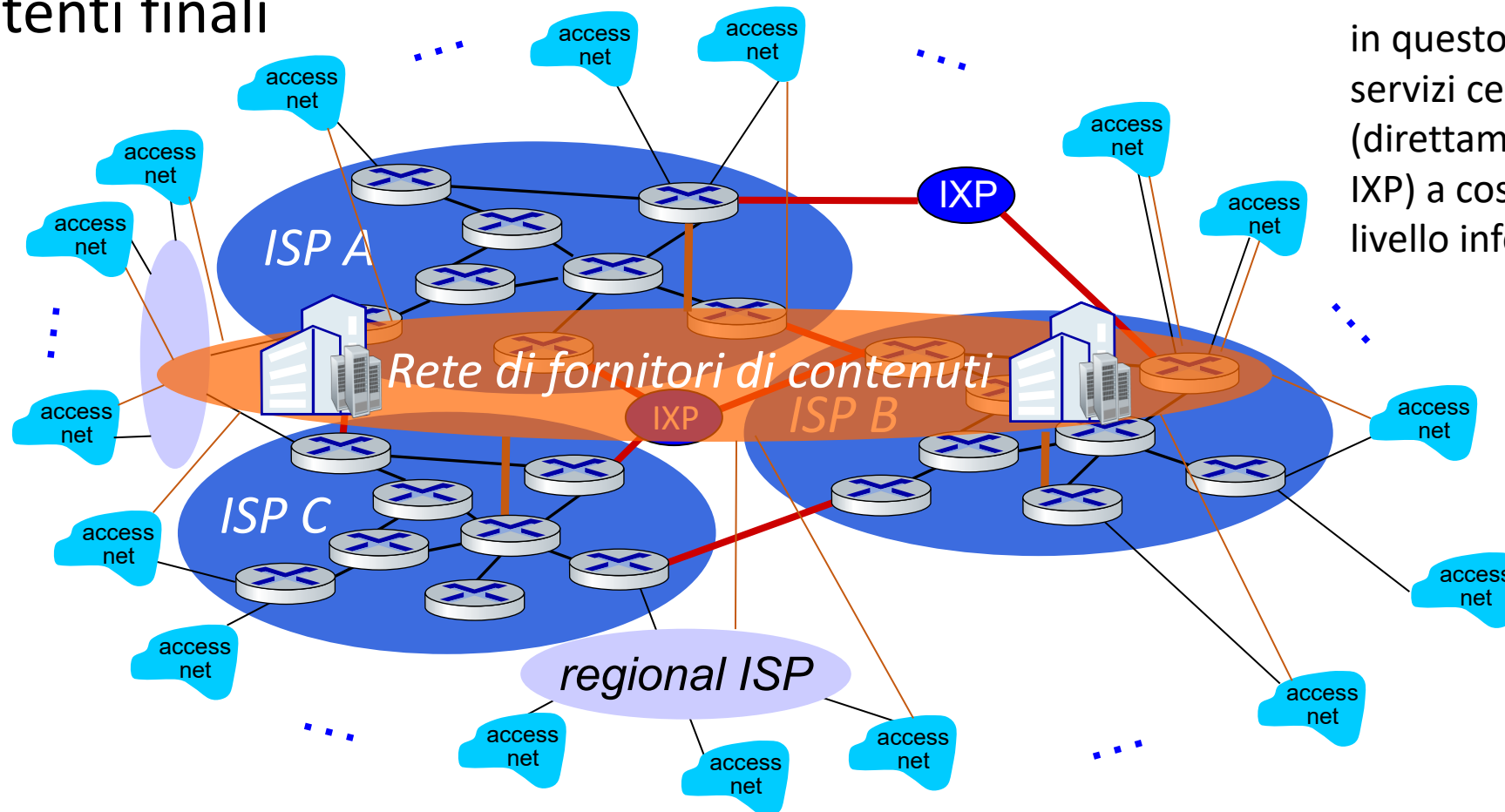
... e reti regionali possono sorgere per collegare le reti di accesso agli ISP



PoP (point of presence) : uno o più router
nella rete del fornitore cui si possono
connettere i client

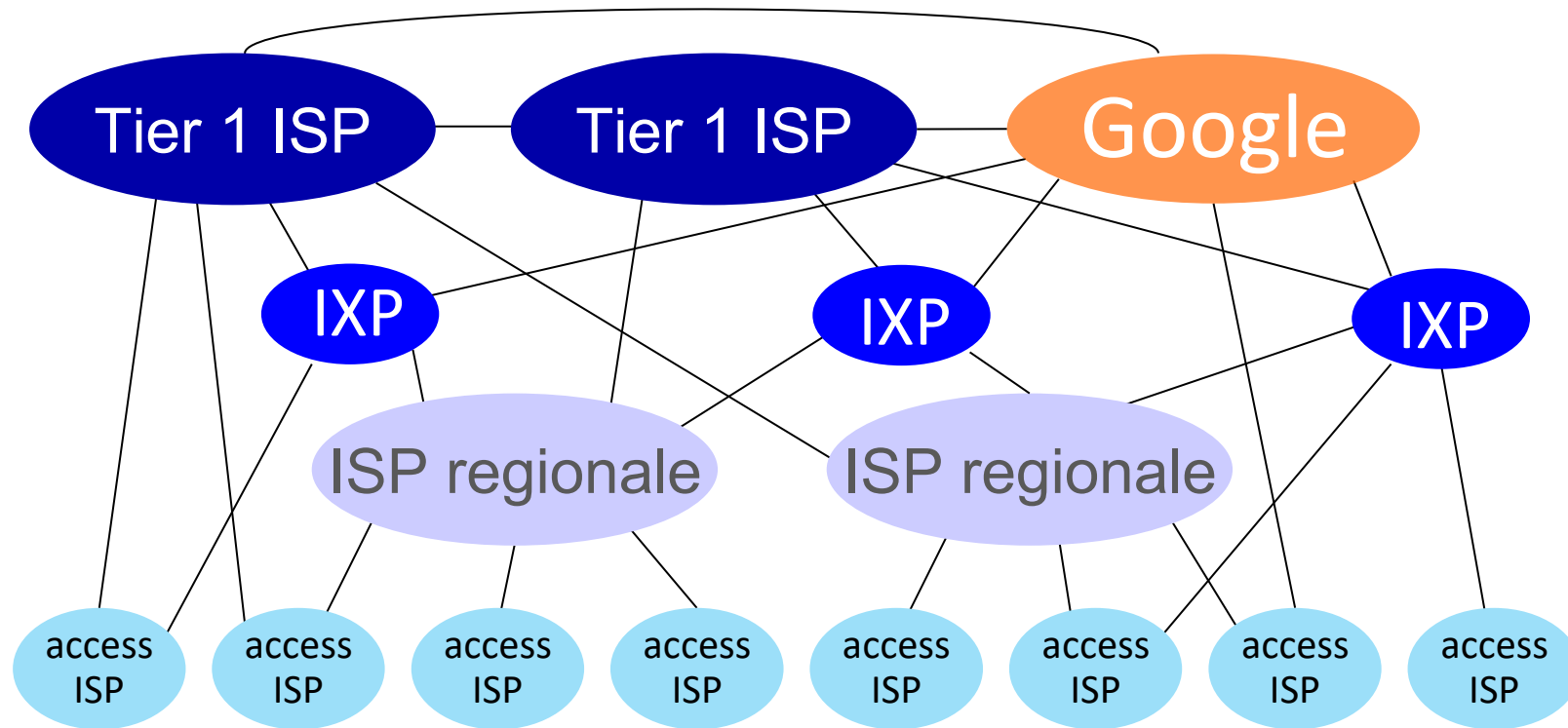
Struttura di Internet: una “rete di reti”

... e le reti di fornitori di contenuti (ad esempio, Google, Microsoft, Akamai) possono gestire la propria rete, per avvicinare servizi e contenuti agli utenti finali



in questo modo i fornitori di servizi cercano di fare peering (direttamente o tramite gli IXP) a costo zero con gli ISP di livello inferiore

Struttura di Internet: una “rete di reti”



Al “centro”: un piccolo numero di grandi reti ben connesse

- **ISP commerciali “tier-1”** (es., Level 3, Sprint, AT&T, NTT), copertura nazionale & internazionale
- **Rete di fornitori di contenuti** (es., Google, Facebook): reti private che connettono i suoi data center a Internet, spesso aggirando ISP tier-1 e regionali

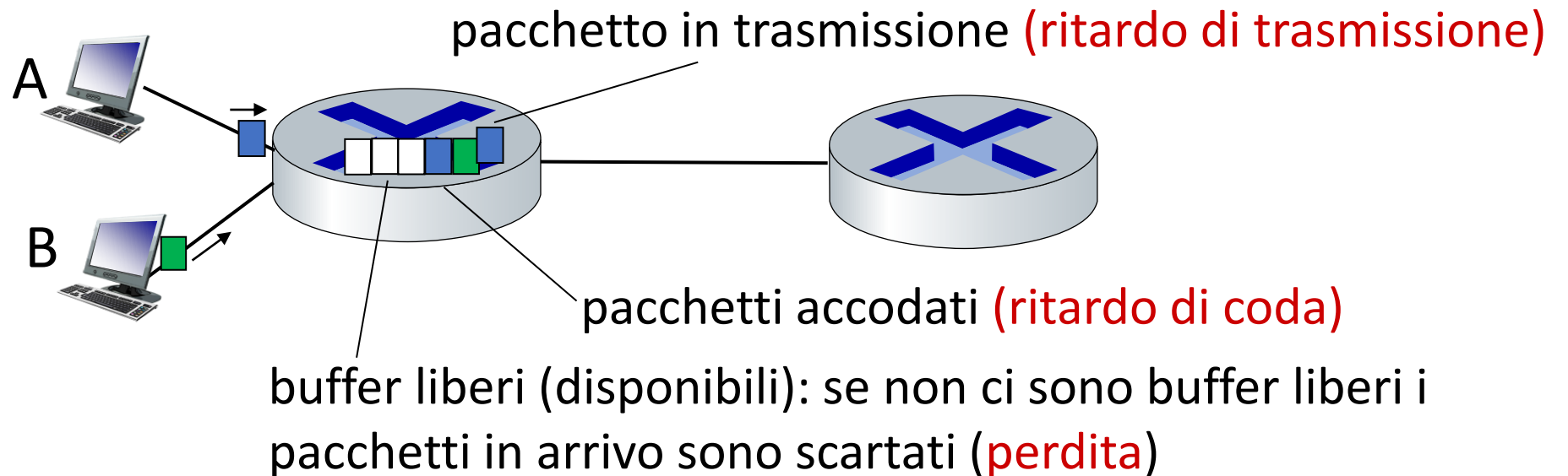
Capitolo 1: tabella di marcia

- Cos'è Internet?
- Cos'è un protocollo?
- Ai confini della rete: host, reti di accesso, mezzi trasmissivi
- Il nucleo della rete: commutazione di pacchetto e commutazione di circuito, struttura di Internet
- **Prestazioni:** perdite, ritardi, throughput
- Sicurezza
- Livelli di protocollo, modelli di servizio
- Un po' di storia

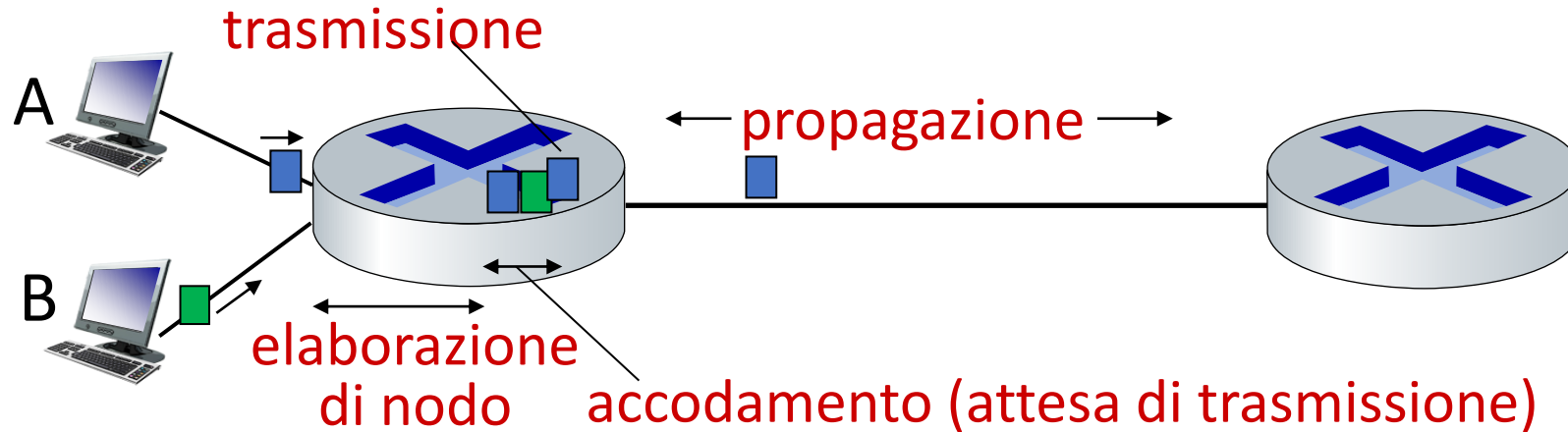


Come si verificano ritardi e perdite?

- i pacchetti *si accodano* nei buffer del router, aspettando il proprio turno per la trasmissione
 - la lunghezza della coda cresce quando il tasso di arrivo dei pacchetti sul collegamento eccede (temporaneamente) la capacità del collegamento di evaderli
- la *perdita* di pacchetti si verifica quando la memoria che contiene la coda dei pacchetti si riempie



Ritardo per i pacchetti: quattro cause



$$d_{\text{nodo}} = d_{\text{elab}} + d_{\text{acc}} + d_{\text{trasm}} + d_{\text{prop}}$$

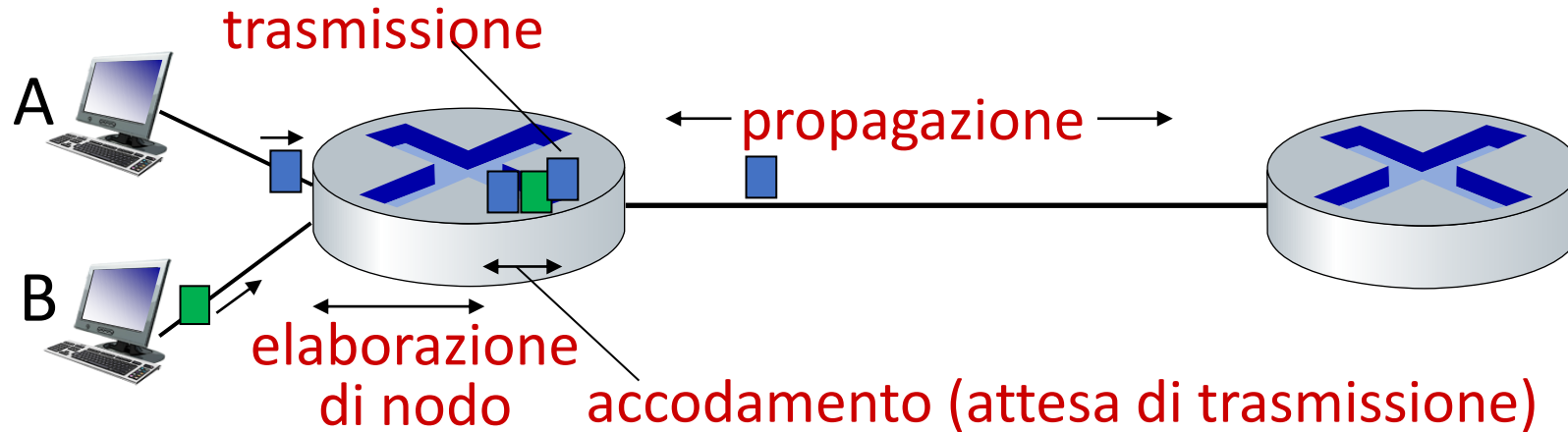
d_{elab} : elaborazione di nodo

- controllo errori sui bit
- determinazione del canale di uscita
- tipicamente < microsecondi

d_{acc} : ritardo di accodamento

- attesa di trasmissione
- dipende dal livello di congestione del router

Ritardo per i pacchetti: quattro cause



$$d_{\text{nodo}} = d_{\text{elab}} + d_{\text{acc}} + d_{\text{trasm}} + d_{\text{prop}}$$

d_{trasm} : ritardo di trasmissione:

- L : lunghezza del pacchetto (in bit)
- R : tasso di trasmissione del collegamento (in bps)

▪ $d_{\text{trasm}} = L/R$

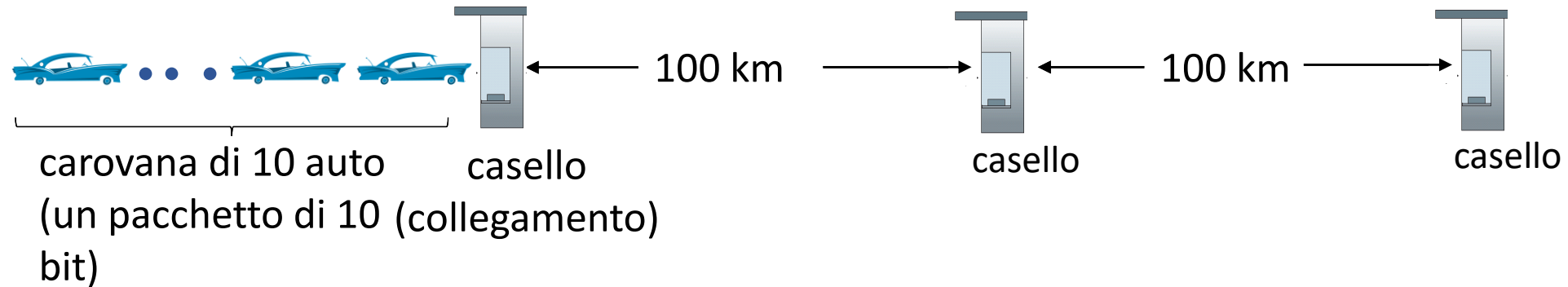
d_{prop} : ritardo di propagazione:

- d : lunghezza del collegamento fisico
- v : velocità di propagazione ($\sim 2 \times 10^8$ m/sec)

▪ $d_{\text{prop}} = d/v$

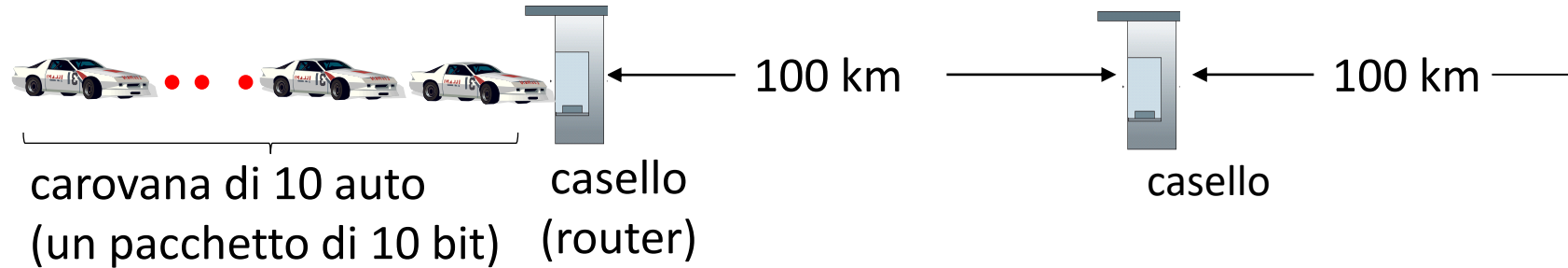
d_{trasm} e d_{prop}
molto diversi

L'analogia della carovana



- auto \sim bit; carovana \sim pacchetto; casello \sim collegamento
- Al casello occorrono 12 s per servire ciascuna auto (trasmettere un bit)
- si “propagano” a 100 km/h
- **D: Tra quanto tempo la carovana sarà in fila davanti al secondo casello?**
- tempo per "spingere" l'intera carovana attraverso il casello sull'autostrada = $12 \cdot 10 = 120$ secondi.
- tempo di propagazione dell'ultimo veicolo dal 1° al 2° pedaggio: $100\text{km}/(100\text{km/h}) = 1$ ora
- **R: 62 minuti**

L'analogia della carovana



- supponiamo che le auto ora "si propagano" a 1000 km/h
 - e supponiamo che i casellanti ora impieghino un minuto per servire un'autovettura
 - **D: Le auto arriveranno al secondo casello prima di tutte le auto servite dal primo casello?**
- R: Sì!** dopo 7 minuti, la prima auto arriva al secondo casello; tre auto sono ancora al primo casello

Commutazione di pacchetto: ritardo end-to-end (o punto-punto)

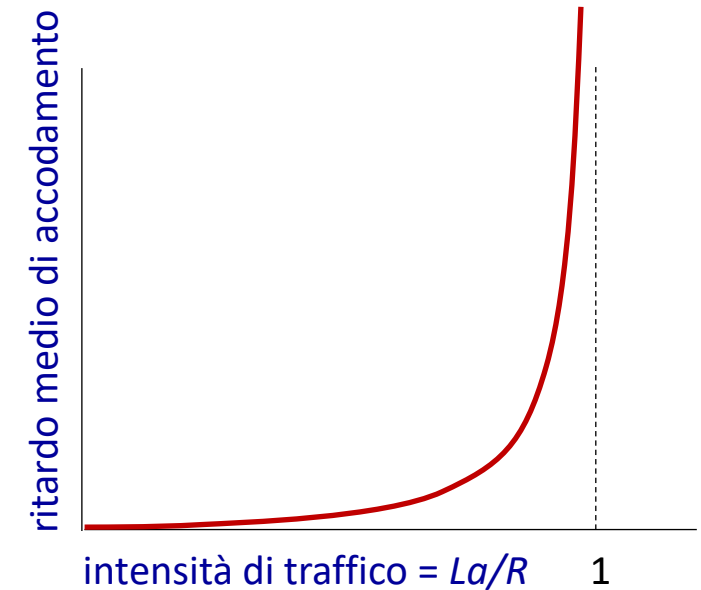
I ritardi totali di nodo cui è incorso un pacchetto lungo il suo percorso dalla sorgente alla destinazione si accumulano, determinando un ritardo end-to-end (o punto-punto) pari a:

$$d_{end-to-end} = \sum_i (d_{elab_i} + d_{acc_i} + d_{trasm_i} + d_{prop_i})$$

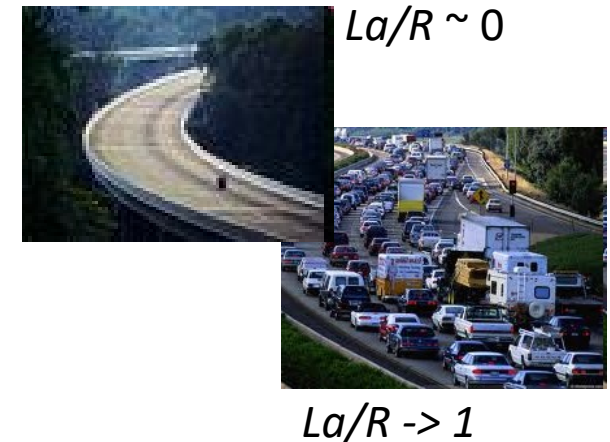
Ritardo di accodamento dei pacchetti (rivisitato)

- a : velocità media di arrivo dei pacchetti
- L : lunghezza del pacchetto (in bit)
- R : velocità di trasmissione (in bit/s)

$$\frac{L \cdot a}{R} : \frac{\text{velocità di arrivo dei bit}}{\text{velocità di servizio dei bit}} \quad \text{“intensità di traffico”}$$

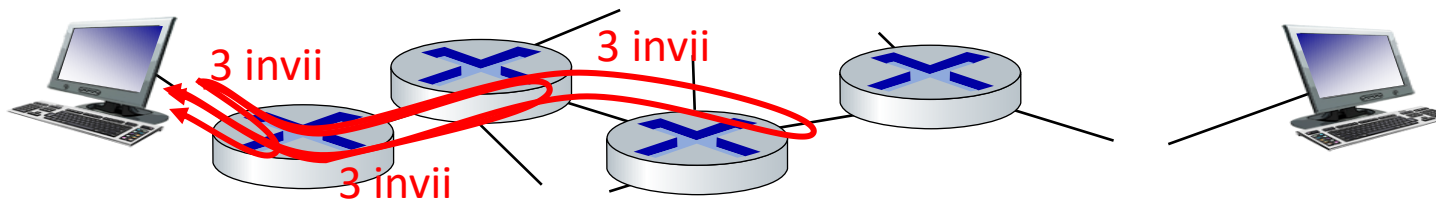


- $La/R \sim 0$: ritardo medio di accodamento piccolo
- $La/R \rightarrow 1$: ritardo medio di accodamento grande
- $La/R > 1$: più "lavoro" in arrivo di quanto possa essere servito - ritardo tende all'infinito!



Ritardi e percorsi in Internet

- Ma cosa significano effettivamente ritardi e perdite nella “vera” Internet?
- **traceroute**: programma diagnostico che fornisce una misura del ritardo dalla sorgente al router lungo i percorsi Internet punto-punto verso la destinazione. For all i :
 - invia tre pacchetti che raggiungeranno il router i sul percorso verso la destinazione (con il campo time-to-live uguale a i)
 - il router i restituirà i pacchetti al mittente
 - il mittente calcola l'intervallo tra trasmissione e risposta



Ritardi e percorsi in Internet

traceroute: da gaia.cs.umass.edu a www.eurecom.fr

Tre misure di ritardo da
gaia.cs.umass.edu a cs-gw.cs.umass.edu

3 misure di ritardo verso
border1-rt-fa5-1-0.gw.umass.edu

collegamento
transoceanico
sembra che i ritardi
diminuiscano! Perché?

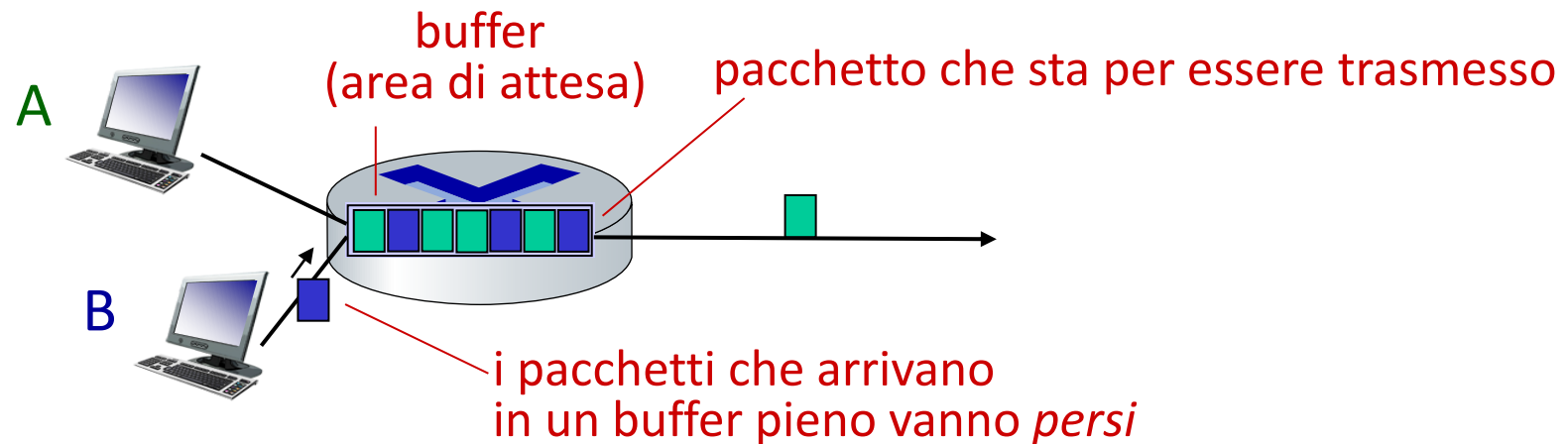
* significa nessuna risposta (risposta persa, router non risponde)

1	cs-gw (128.119.240.254)	1 ms	1 ms	2 ms
2	border1-rt-fa5-1-0.gw.umass.edu (128.119.3.145)	1 ms	1 ms	2 ms
3	cht-vbns.gw.umass.edu (128.119.3.130)	6 ms	5 ms	5 ms
4	jn1-at1-0-0-19.wor.vbns.net (204.147.132.129)	16 ms	11 ms	13 ms
5	jn1-so7-0-0-0.wae.vbns.net (204.147.136.136)	21 ms	18 ms	18 ms
6	abilene-vbns.abilene.ucaid.edu (198.32.11.9)	22 ms	18 ms	22 ms
7	nycm-wash.abilene.ucaid.edu (198.32.8.46)	22 ms	22 ms	22 ms
8	62.40.103.253 (62.40.103.253)	104 ms	109 ms	106 ms
9	de2-1.de1.de.geant.net (62.40.96.129)	109 ms	102 ms	104 ms
10	de.fr1.fr.geant.net (62.40.96.50)	113 ms	121 ms	114 ms
11	renater-gw.fr1.fr.geant.net (62.40.103.54)	112 ms	114 ms	112 ms
12	nio-n2.cssi.renater.fr (193.51.206.13)	111 ms	114 ms	116 ms
13	nice.cssi.renater.fr (195.220.98.102)	123 ms	125 ms	124 ms
14	r3t2-nice.cssi.renater.fr (195.220.98.110)	126 ms	126 ms	124 ms
15	eurecom-valbonne.r3t2.ft.net (193.48.50.54)	135 ms	128 ms	133 ms
16	194.214.211.25 (194.214.211.25)	126 ms	128 ms	126 ms
17	***			
18	***			
19	fantasia.eurecom.fr (193.55.113.142)	132 ms	128 ms	136 ms

* Do some traceroutes from exotic countries at www.traceroute.org

Perdita di pacchetti

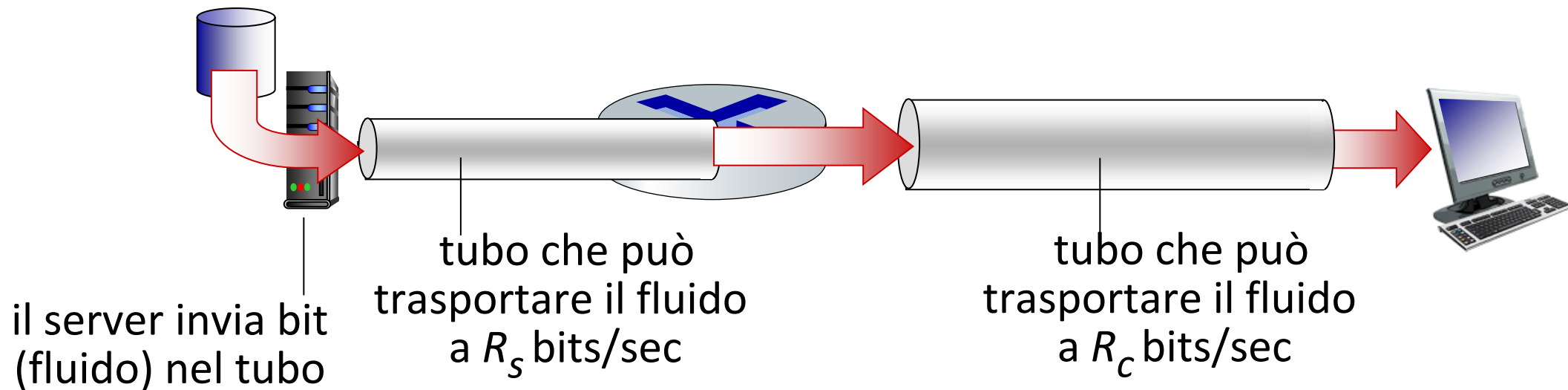
- la coda (anche detta buffer) che precede un collegamento è ha capacità finita
- quando il pacchetto trova la coda piena, viene scartato (e quindi va perso)
- il pacchetto perso può essere ritrasmesso dal nodo precedente, dal sistema terminale che lo ha generato, o non essere ritrasmesso affatto



* Check out the Java applet for an interactive animation (on publisher's website) of queuing and loss

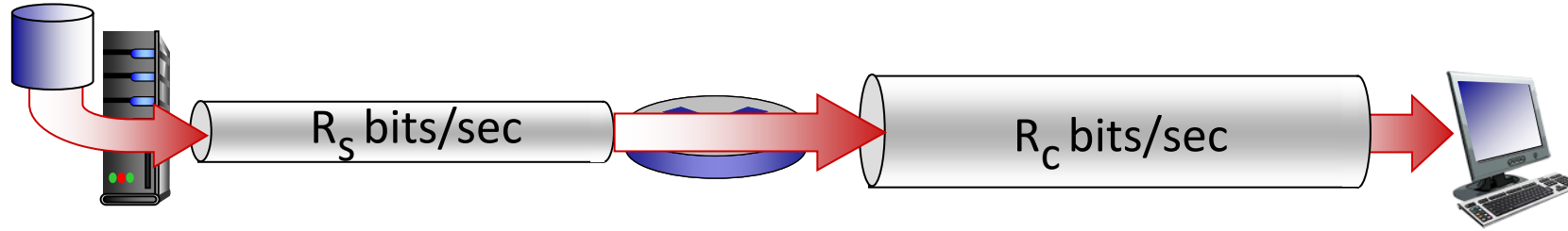
Throughput

- **throughput**: frequenza (bit/unità di tempo) alla quale i bit sono trasferiti tra mittente e ricevente
 - **istantaneo**: in un determinato istante
 - **medio**: in un periodo di tempo più lungo (es. il throughput medio del trasferimento di un file di F bit in T secondi è F/T bps)

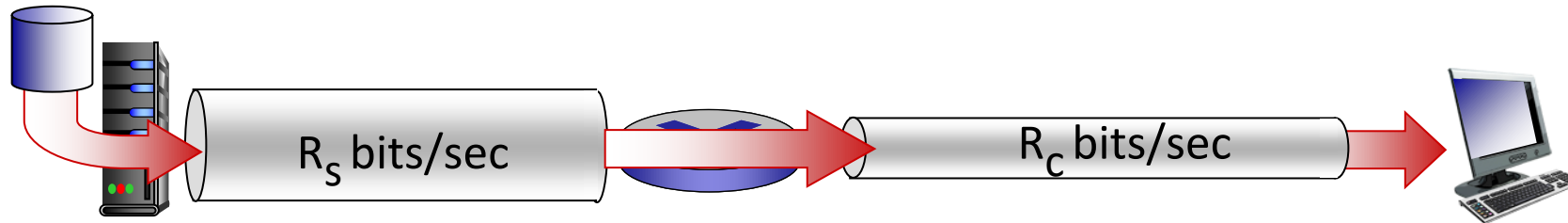


Throughput

$R_s < R_c$ Qual è il throughput medio end to end?



$R_s > R_c$ Qual è il throughput medio end to end?

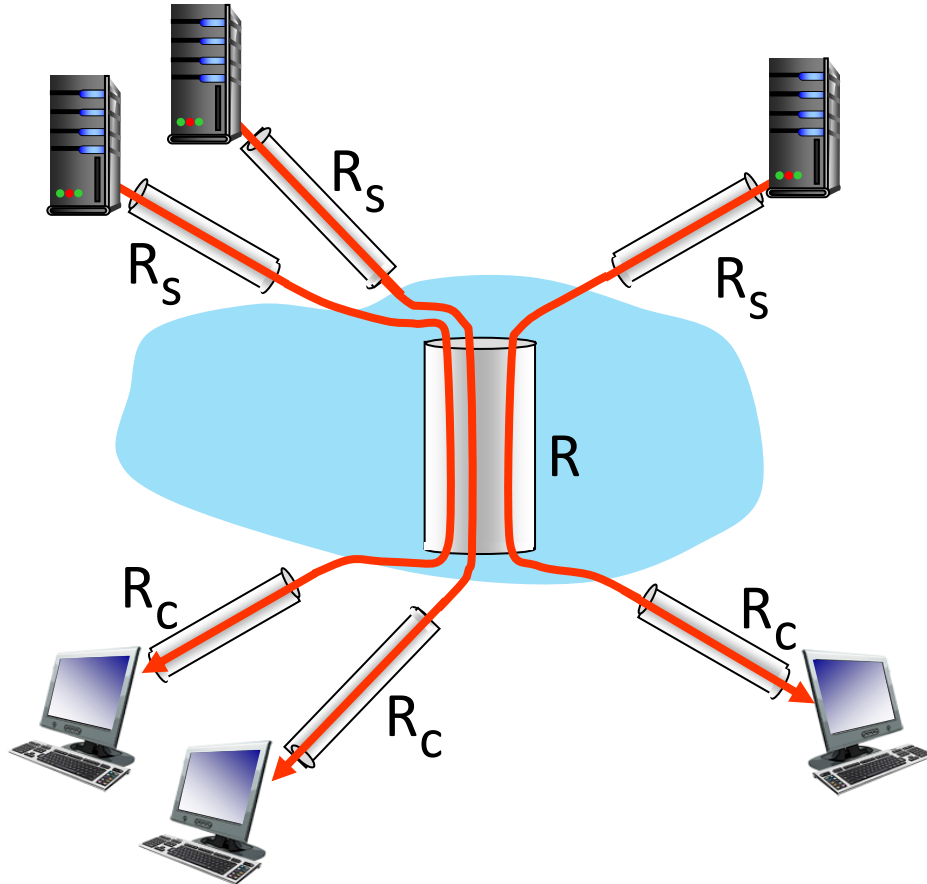


In entrambi i casi, abbiamo assunto che i soli bit inviati sulla rete siano quelli tra client e server

Collo di bottiglia

Collegamento su un percorso punto-punto che vincola un throughput end to end

Throughput: scenario Internet



10 connessioni (equamente)
condividono il link del collo di
bottiglia della dorsale R bits/sec

- throughput end to end per ciascuna connessione:
 $\min(R_c, R_s, R/10)$
- in pratica: R_c o R_s è spesso il collo di bottiglia

* Check out the online interactive exercises for more examples: http://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/

Throughput: osservazioni

- Il throughput end-to-end dipende dalla velocità di trasmissione dei collegamenti attraversati dal flusso di dati
 - se il percorso non è interessato da altro traffico:
 $throughput \approx \min\{R_i\}$ dove R_i è la velocità di trasmissione dell' i -esimo collegamento
 - altrimenti, come fatto nella slide sullo "scenario Internet", occorre suddividere la velocità di trasmissione di un collegamento tra i vari flussi che lo attraversano
- Il throughput effettivo può essere inferiore a causa di altri fattori (es. i protocolli usati)