



DeepL

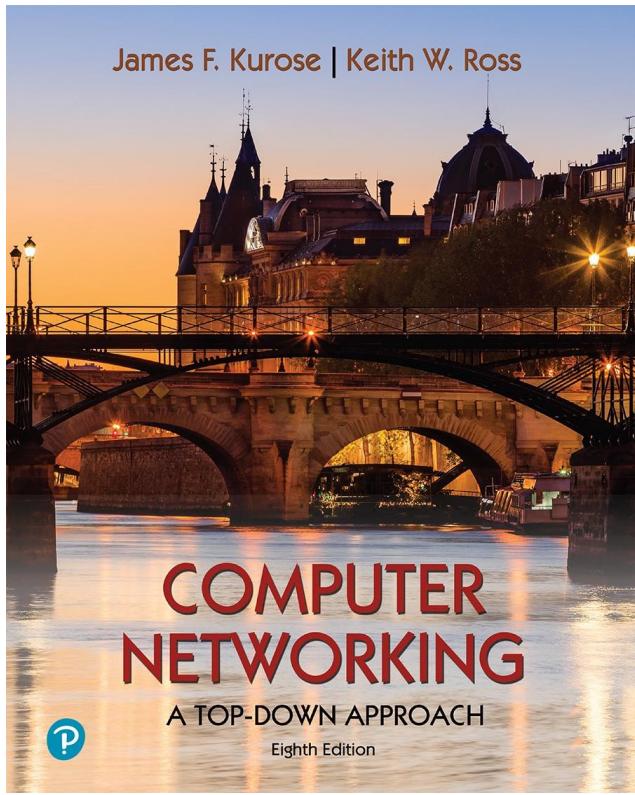
Abbonati a DeepL Pro per tradurre file di maggiori dimensioni.  
Per ulteriori informazioni, visita [www.DeepL.com/pro](https://www.DeepL.com/pro).

# Capitolo 1

# Introduzione

# e

Tutto il materiale è protetto da copyright 1996-2023  
J.F Kurose e K.W. Ross, Tutti i diritti riservati



Jim Kurose, Keith Ross  
Pearson, 2020

*Reti di computer:  
Un approccio  
dall'alto verso il  
basso*  
8<sup>th</sup> edizione

# Introduzione

## *Panoramica/strada da percorrere:*

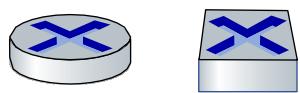
- Che cos'è Internet? Che cos'è un protocollo?
- Bordo della rete: host, rete di accesso, supporti fisici
- Nucleo della rete: commutazione di pacchetto/circuito, struttura di Internet
- Prestazioni: perdita, ritardo, throughput
- Livelli di protocollo, modelli di servizio
- Sicurezza
- La storia

# Internet



Miliardi di *dispositivi* informatici connessi:

- *host* = *sistemi finali*
- eseguire le *applicazioni di rete* a Il "bordo" di Internet



*Commutatori di pacchetti*: inoltrano i pacchetti (pacchetti di dati).

- *router, switch*

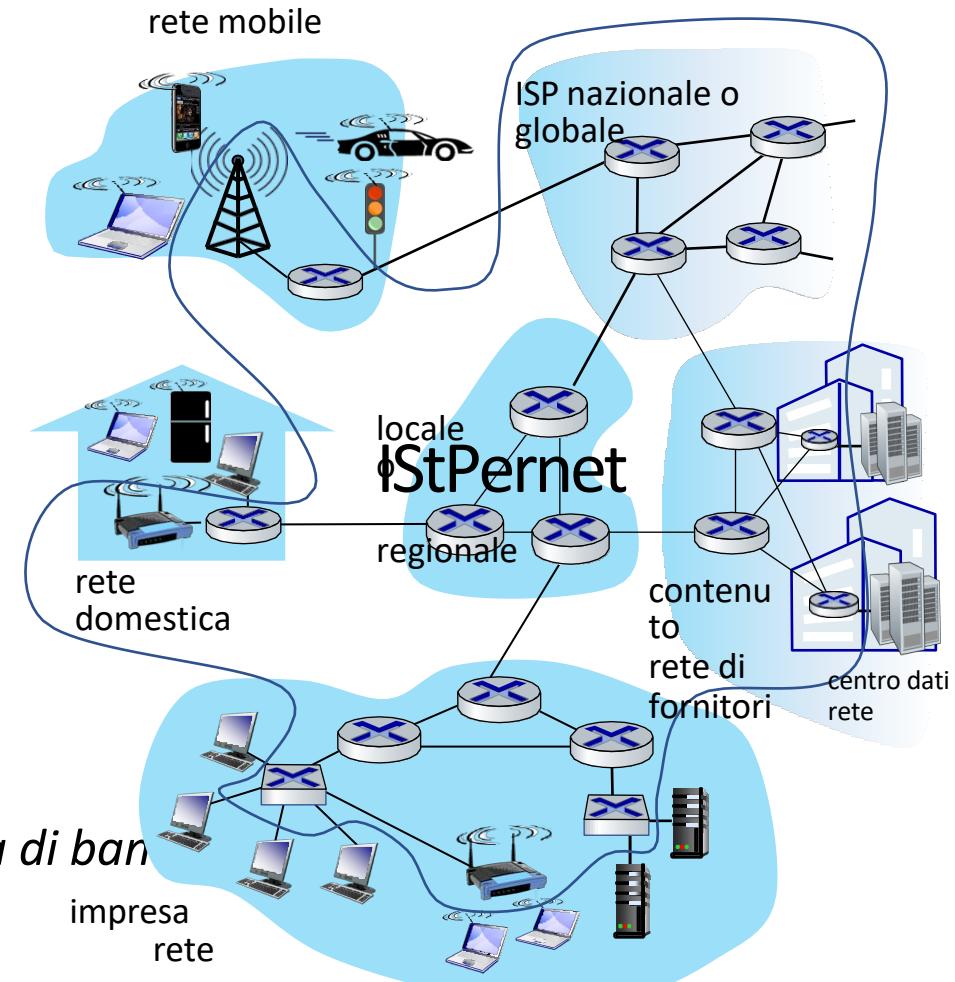


*Collegamenti di comunicazione*

- fibra, rame, radio, satellite
- velocità di trasmissione: *larghezza di banda*

*Reti*

- raccolta di dispositivi, router,



collegamenti: gestiti da  
un'organizzazione

# Dispositivi "divertenti" connessi a Internet



Amazon Echo



Frigorifero a Internet



Telecamera di sicurezza



Cornice IP



Slingbox: TV via cavo con telecomando



Pacemaker e monitor



Tostapane abilitato al web + previsore meteo



Tweet-a-watt:  
monitorare il consumo di energia



biciclette



aut o



scooter



Dispositivi AR



Fitbit

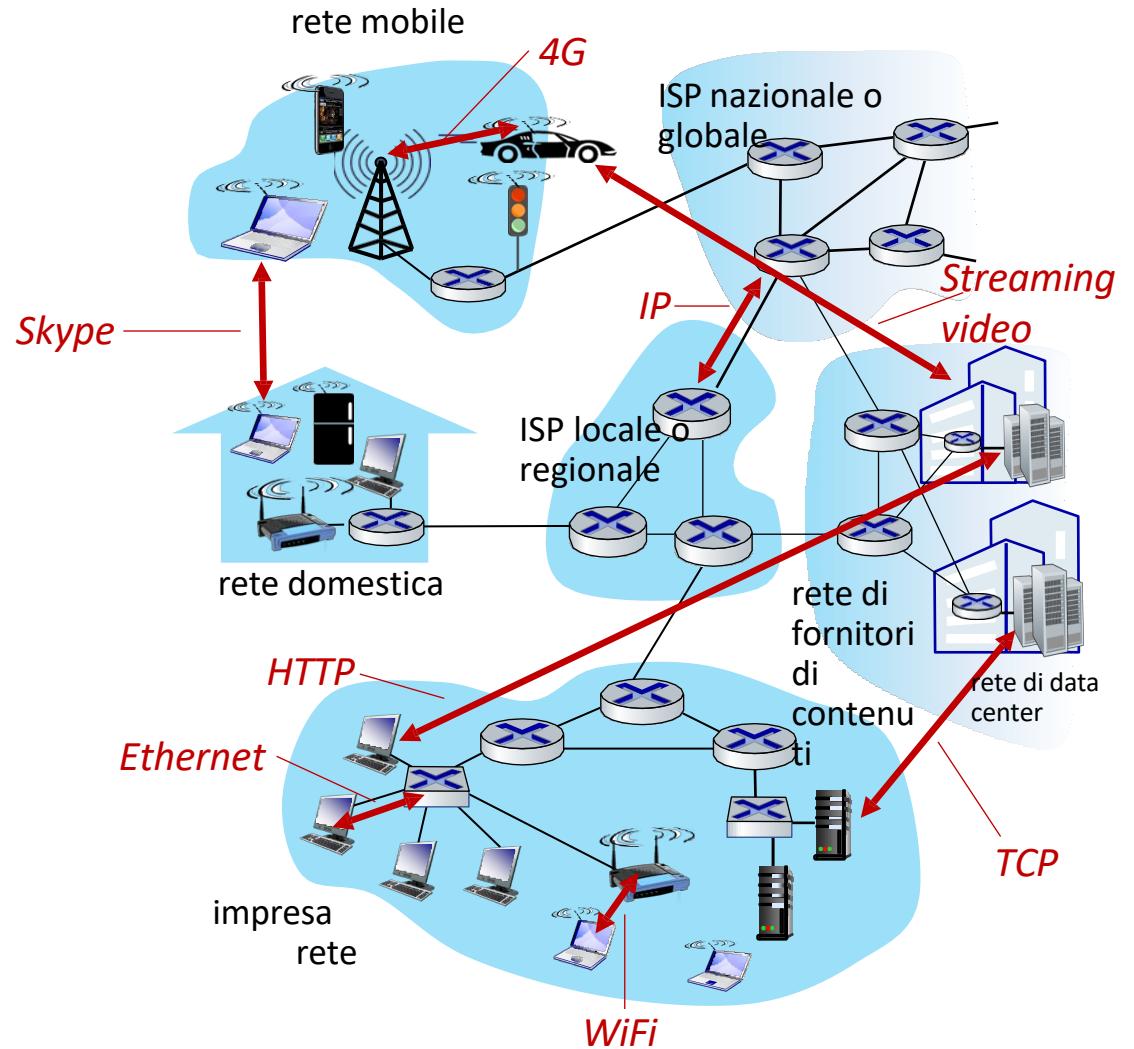


sensoriale,  
materasso da letto



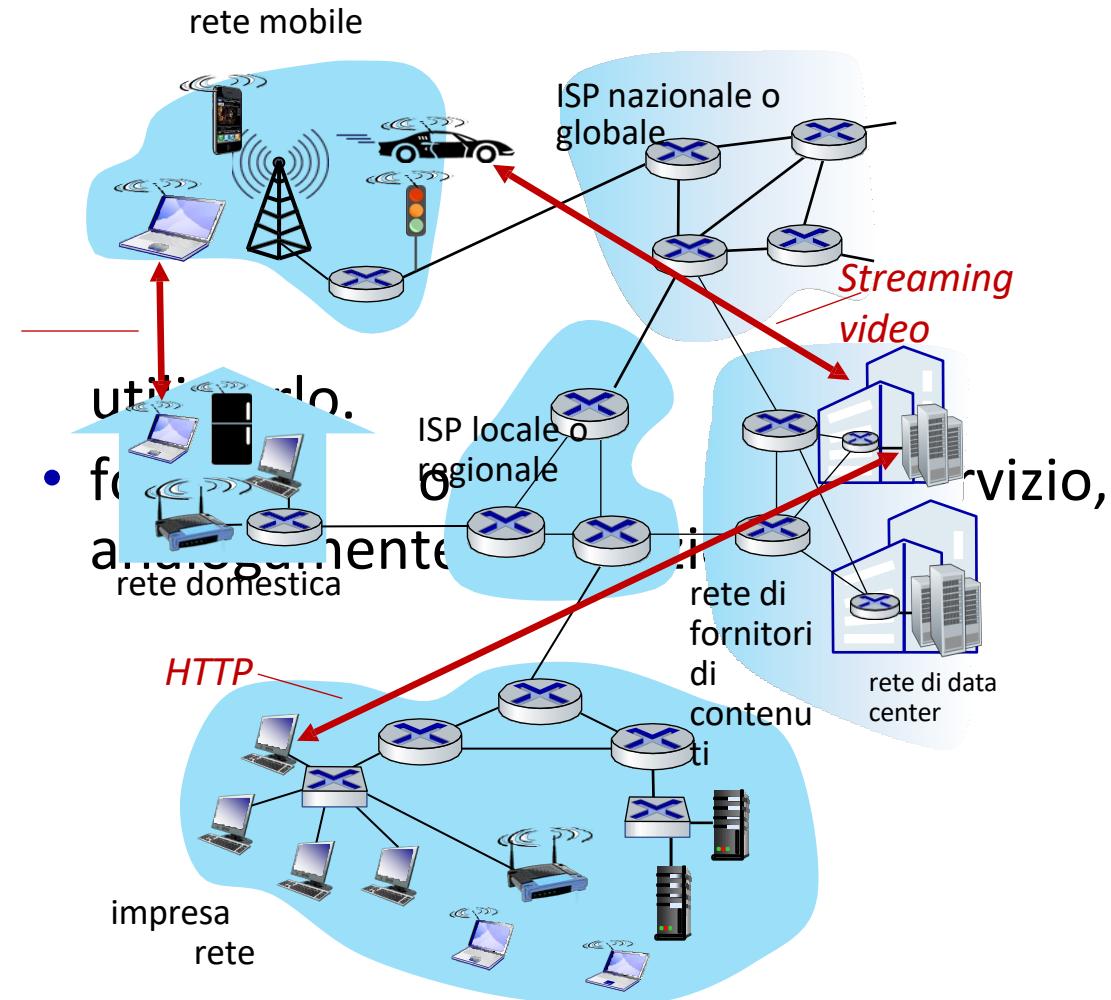
# Internet

- *Internet: "rete di reti"*
  - ISP interconnessi
- *I protocolli sono ovunque*
  - controllare l'invio e la ricezione di messaggi
  - ad esempio, HTTP (Web), streaming video, Skype, TCP, IP, WiFi, 4/5G, Ethernet
- *Standard Internet*
  - RFC: Richiesta di commenti
  - IETF: Internet Engineering Task Force



# Internet: una visione "a servizi"

- *Infrastruttura* che fornisce servizi alle applicazioni:
  - Web, video in streaming, teleconferenze multimediali, e-mail, giochi, e-commerce, social media, inter-elettrodomestici collegati, ...
- fornisce un'*interfaccia di programmazione* alle applicazioni distribuite:
  - "ganci" che consentono alle app di invio/ricezione di "connettersi" al servizio di trasporto Internet e di



*Skype*

# Cos'è un protocollo?

## *Protocolli umani:*

- "Che ora è?"
- "Ho una domanda"
- introduzioni

Regole per:

... messaggi specifici inviati  
... azioni specifiche intraprese  
quando viene ricevuto il messaggio,  
o altri eventi

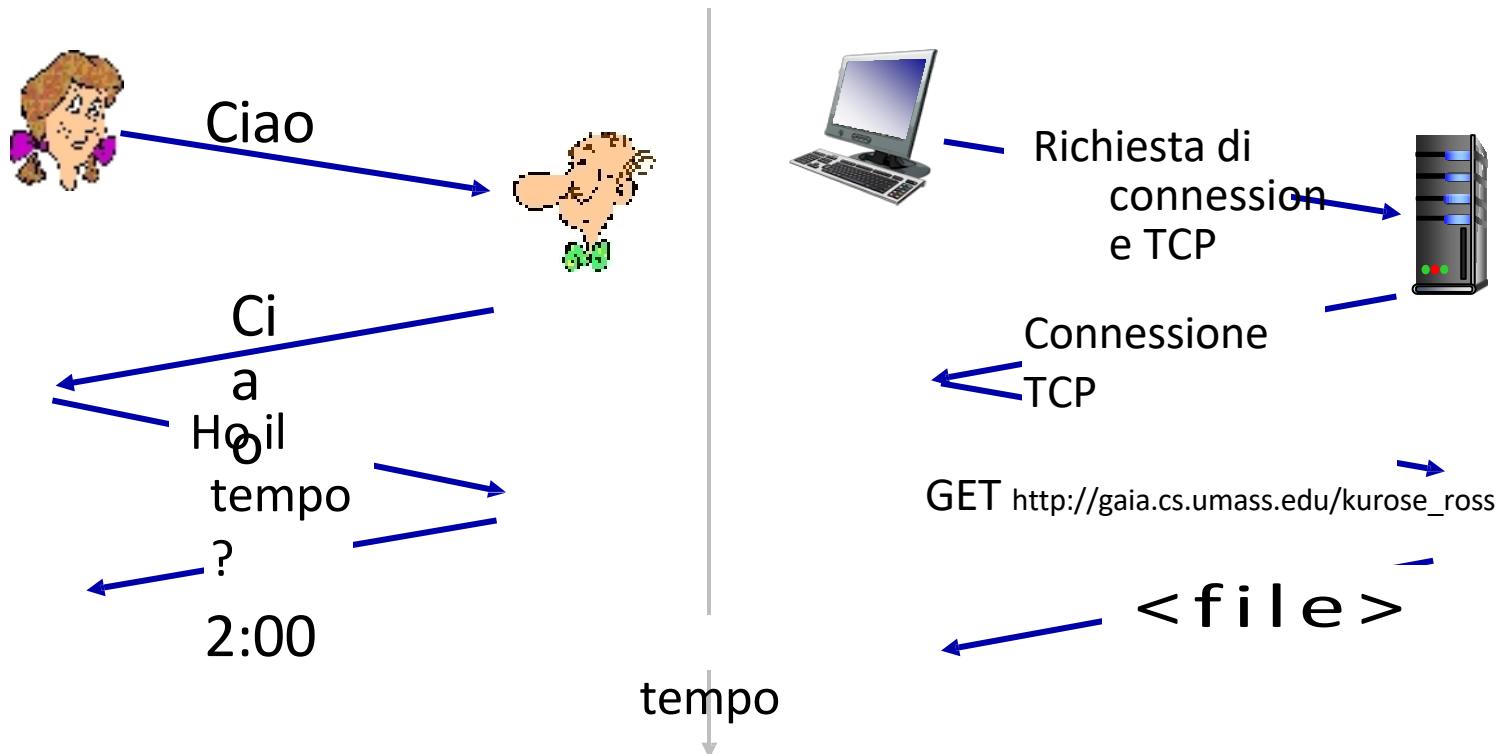
## *Protocolli di rete:*

- computer (dispositivi) piuttosto che umani
- Tutte le attività di comunicazione in Internet sono regolate da protocolli.

*I protocolli definiscono il formato, l'ordine dei messaggi inviati e ricevuti tra le entità della rete e le azioni intraprese in caso di trasmissione e ricezione dei*

# Cos'è un protocollo?

Un protocollo umano e un protocollo di rete informatica:



# Introduzione

- Che cos'è Internet?
- Che cos'è un protocollo?
- **Bordo della rete:** host, rete di accesso, supporti fisici
- Nucleo della rete:  
commutazione di pacchetto/circuito,  
struttura di Internet
- Prestazioni: perdita, ritardo, throughput
- Sicurezza

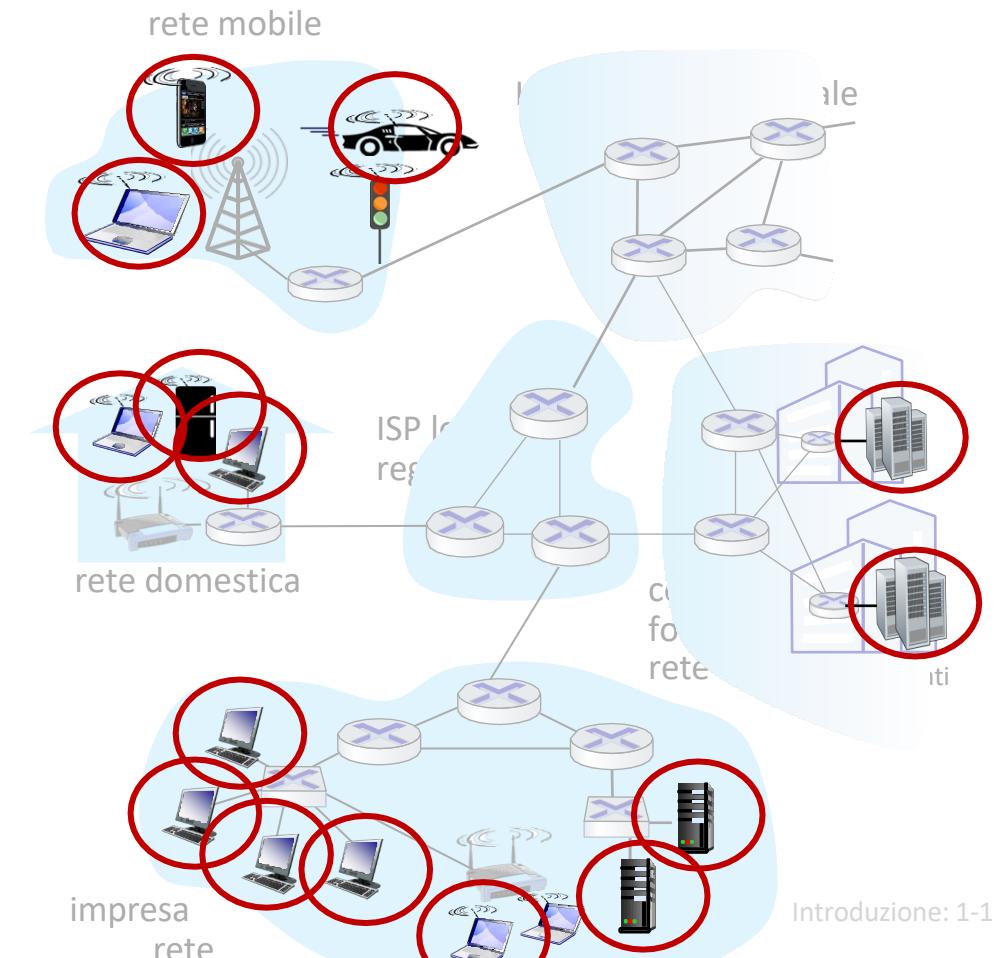


- Livelli di protocollo, modelli di servizio
- La storia

# Uno sguardo più attento alla struttura di Internet

## Bordo della rete:

- host: client e server
- server spesso nei centri dati



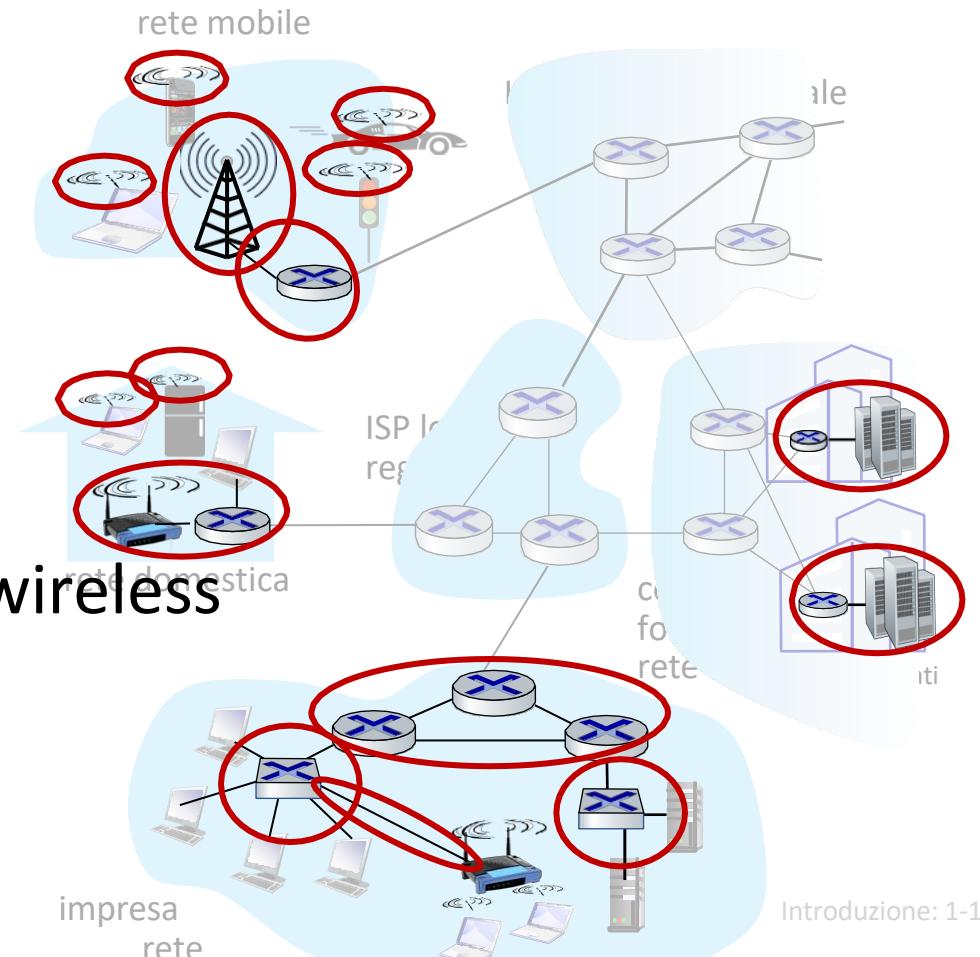
# Uno sguardo più attento alla struttura di Internet

## Bordo della rete:

- host: client e server
- server spesso in centri dati

## Reti di accesso, supporti fisici:

- collegamenti di comunicazione cablati e wireless



# Uno sguardo più attento alla struttura di Internet

## Bordo della rete:

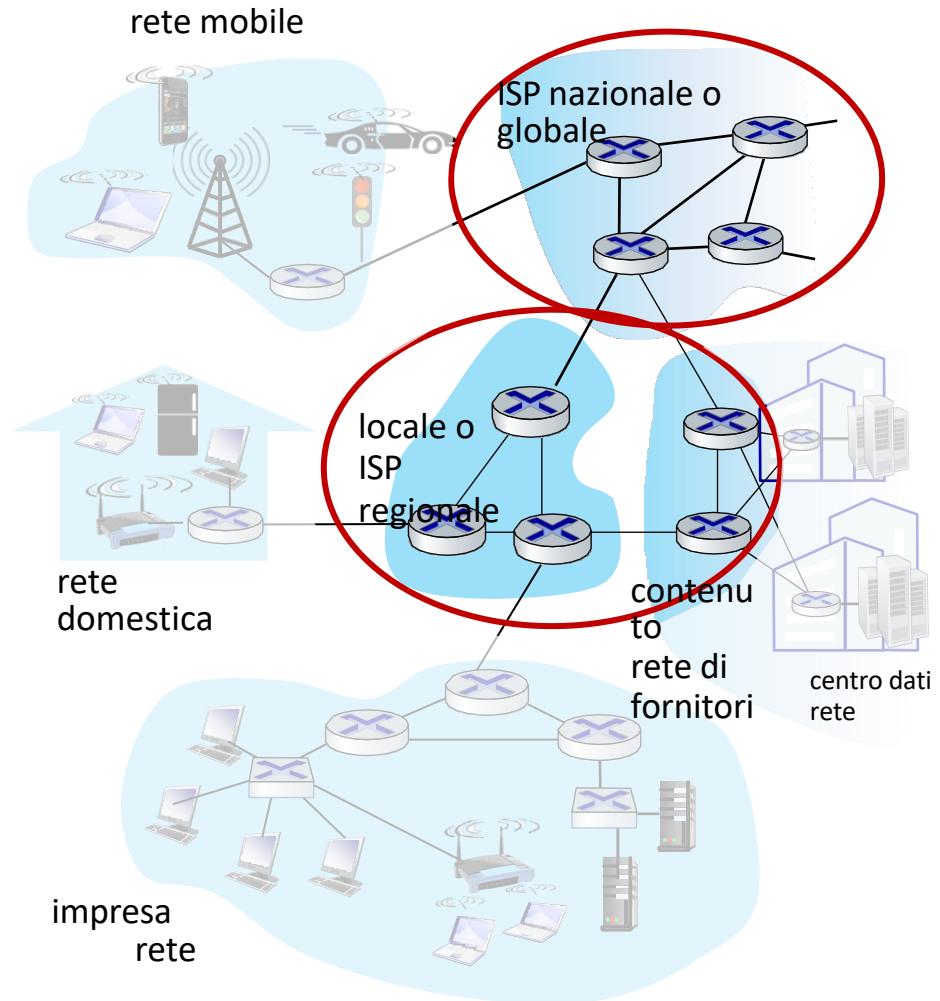
- host: client e server
- server spesso in centri dati

## Reti di accesso, supporti fisici:

Collegamenti di comunicazione  
cablati e wireless

## Nucleo di rete:

- router interconnessi

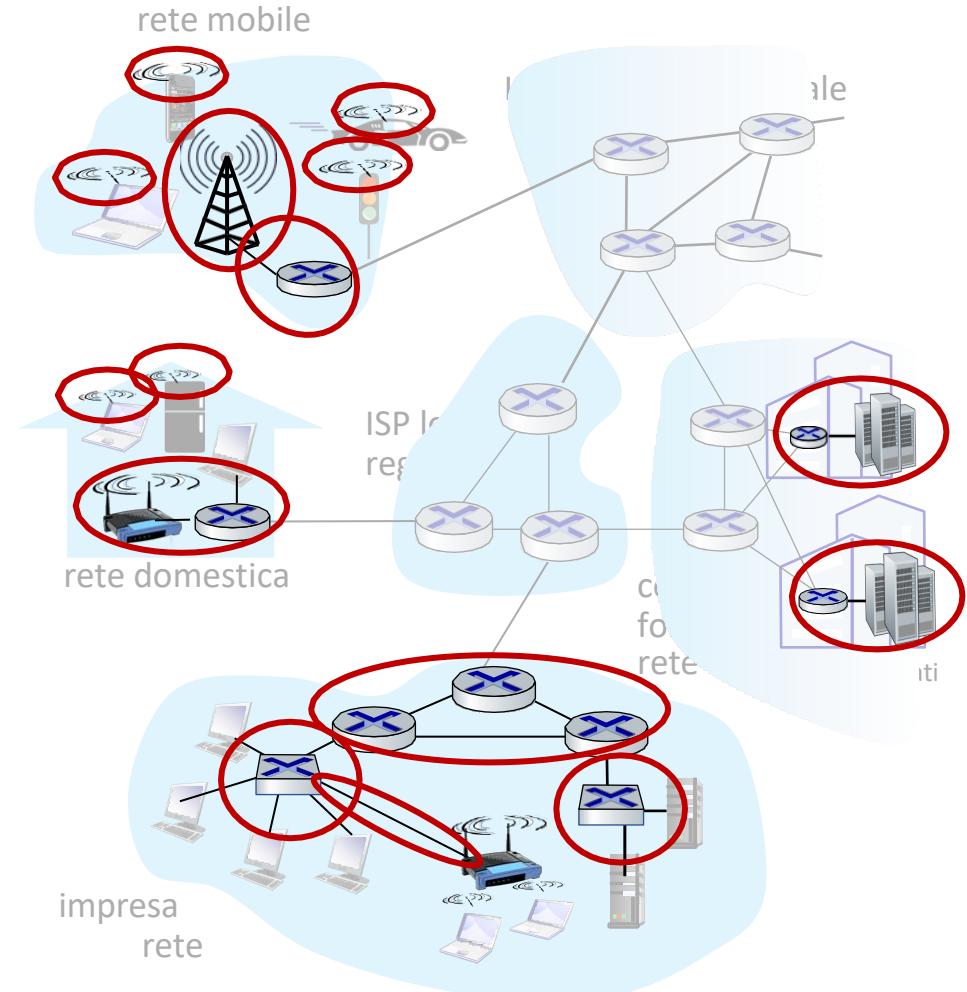


- rete di reti

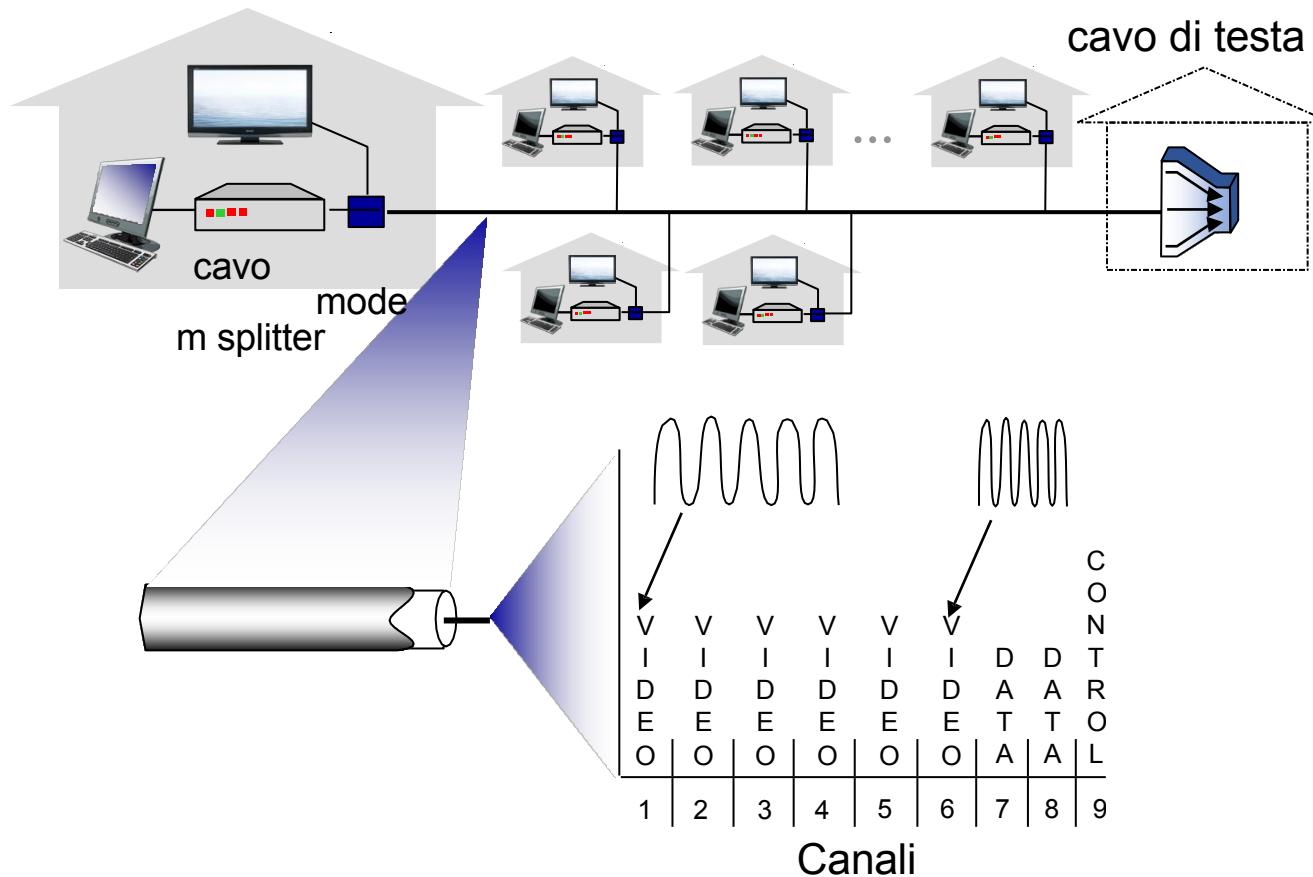
# Accesso alle reti e ai supporti fisici

*D: Come collegare i sistemi finali al router edge?*

- reti di accesso residenziale
- reti di accesso istituzionali (scuola, azienda)
- reti di accesso mobile (WiFi, 4G/5G)

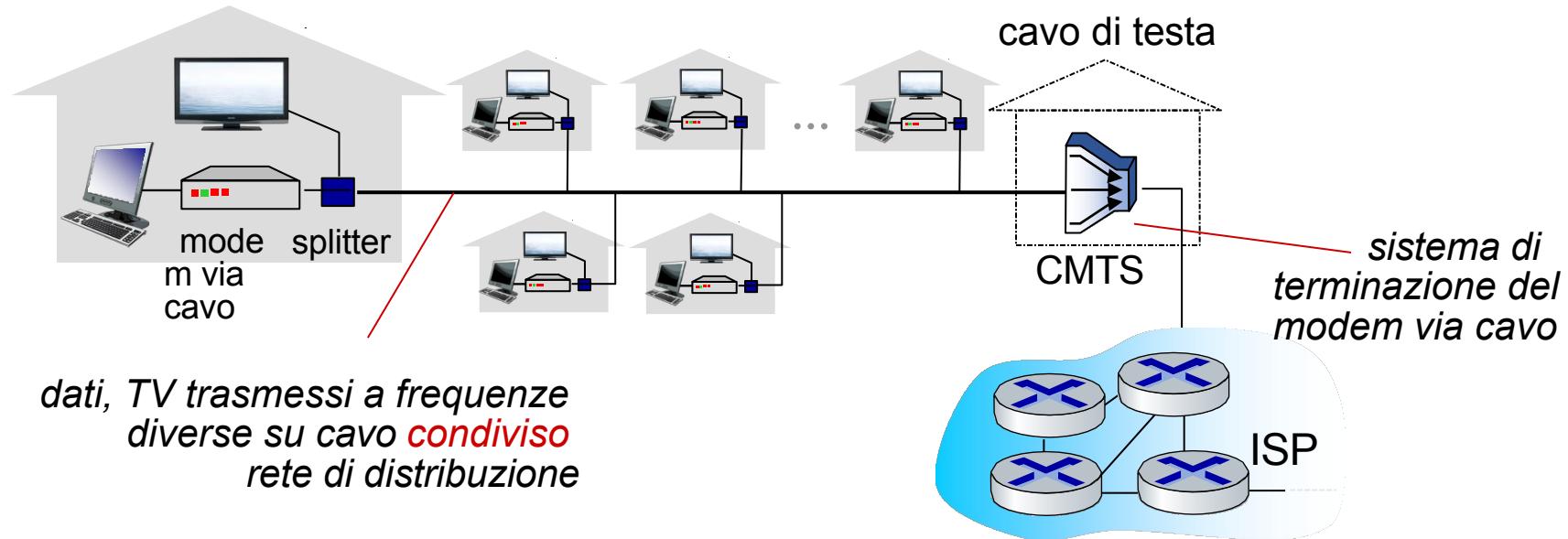


# Reti di accesso: accesso via cavo



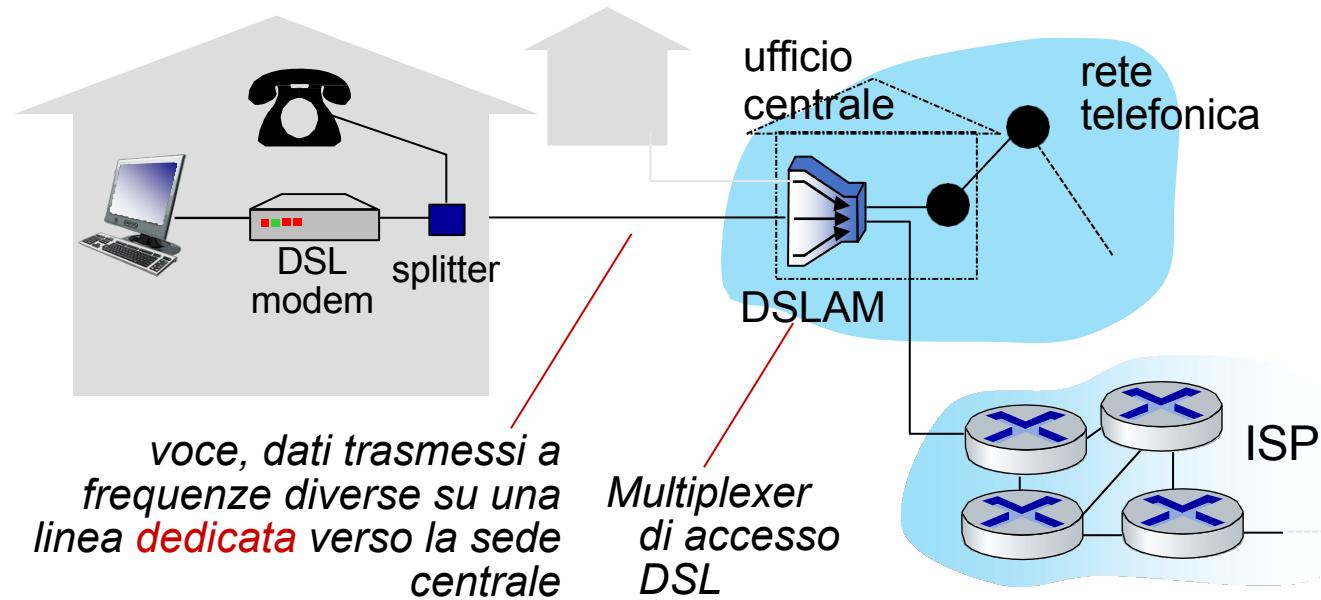
*multiplexing a divisione di frequenza (FDM):* canali diversi trasmessi in bande di frequenza diverse

# Reti di accesso: accesso via cavo



- HFC: fibra coassiale ibrida
  - asimmetrico: fino a 40 Mbps - 1,2 Gbps di velocità di trasmissione downstream, 30-100 Mbps di velocità di trasmissione upstream
- La rete di cavi e fibre ottiche collega le case ai router dell'ISP.
  - Le case **condividono la rete di accesso** alla rete via cavo

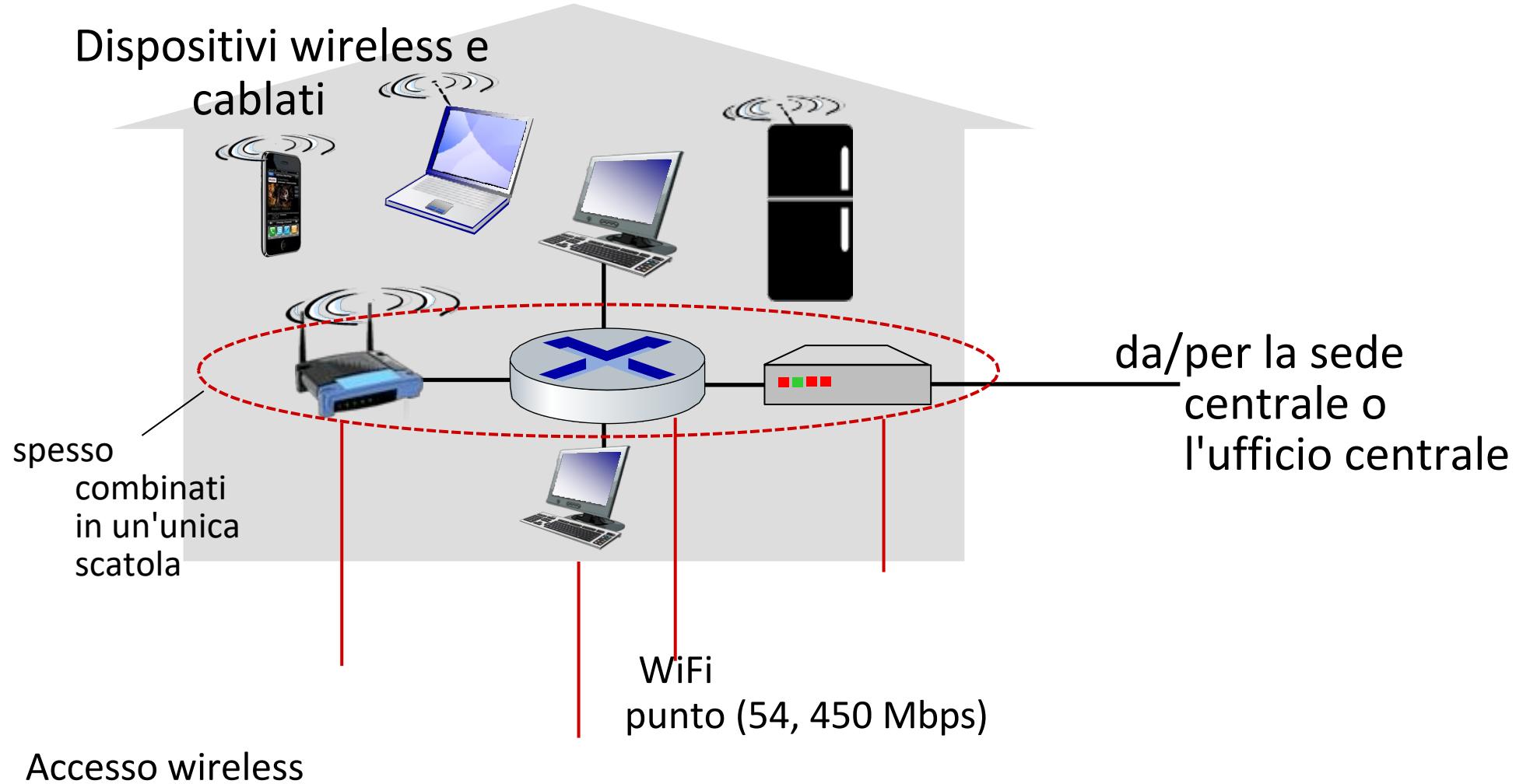
# Reti di accesso: linea digitale ad abbonamento (DSL)



- utilizzare la linea telefonica **esistente** verso il DSLAM della sede centrale
  - i dati attraverso la linea telefonica DSL vanno a Internet
  - la voce su linea telefonica DSL va alla rete telefonica

- Velocità di trasmissione downstream dedicata di 24-52 Mbps
- Velocità di trasmissione upstream dedicata di 3,5-16 Mbps

# Reti di accesso: reti domestiche



modem via cavo o DSL

NAT

Ethernet cablata (1 Gbps)

r  
o  
u  
t  
e  
r  
,

f  
i  
r  
e  
w  
a  
l  
  
,

# Reti di accesso wireless

La rete di accesso *wireless* condivisa collega il sistema finale al router

- attraverso la stazione base, anche detta "punto di accesso"

## Reti locali senza fili (WLAN)

- tipicamente all'interno o intorno a edificio (~30 metri)
- 802.11b/g/n (WiFi): 11, 54, 450 Velocità di trasmissione Mbps



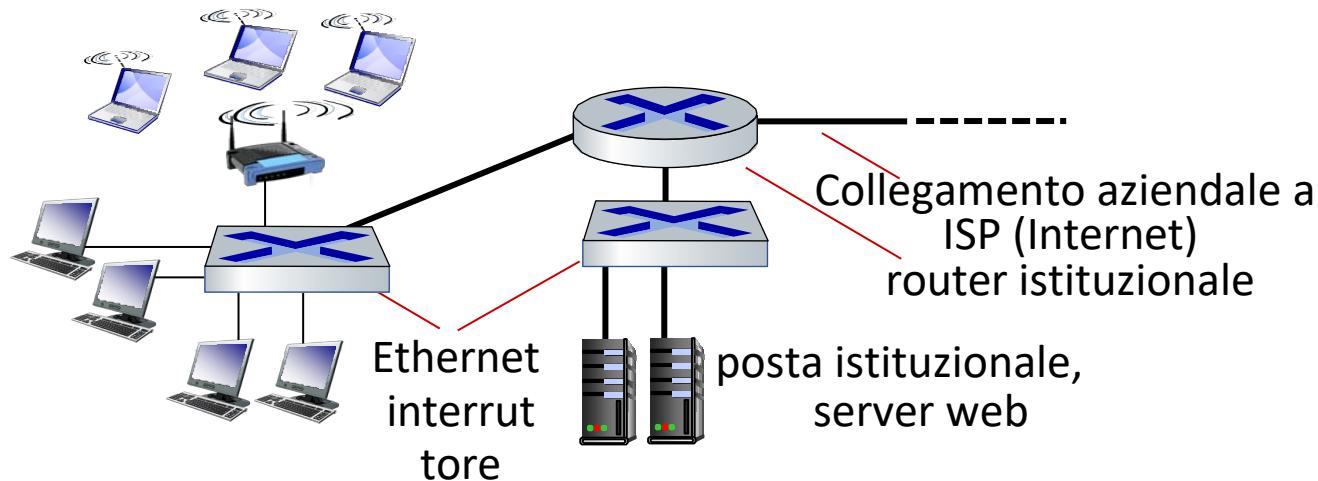
## Reti di accesso cellulare ad ampio raggio

- forniti dalla rete mobile e cellulare operatore (10's km)
- 10's Mbps
- Reti cellulari 4G/5G



*a Internet*

# Reti di accesso: reti aziendali



- aziende, università, ecc.
- mix di tecnologie di collegamento cablate e wireless, con collegamento di un mix di switch e router (le differenze verranno trattate a breve)
  - Ethernet: accesso cablato a 100Mbps, 1Gbps, 10Gbps

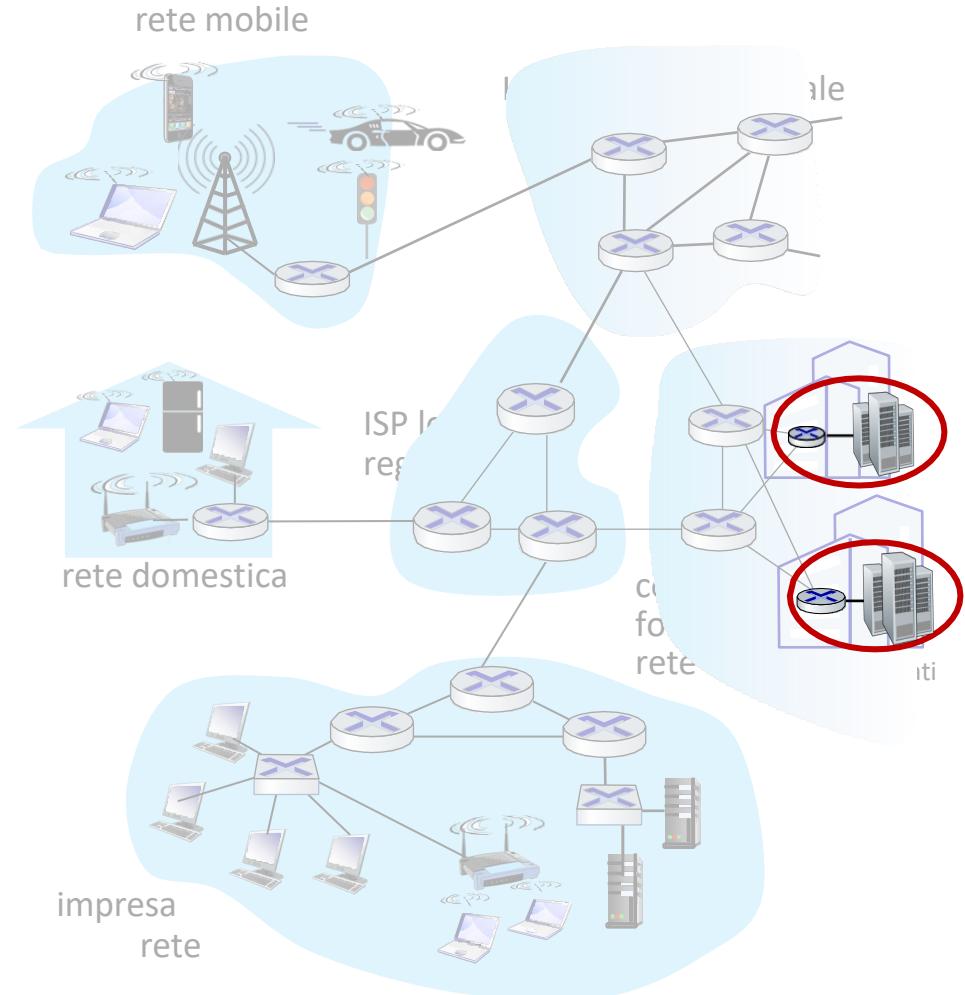
- WiFi: punti di accesso wireless a 11, 54, 450 Mbps

# Reti di accesso: reti di centri dati

- I collegamenti ad alta larghezza di banda (da 10 a 100 Gbps) collegano tra loro centinaia o migliaia di server e a Internet.



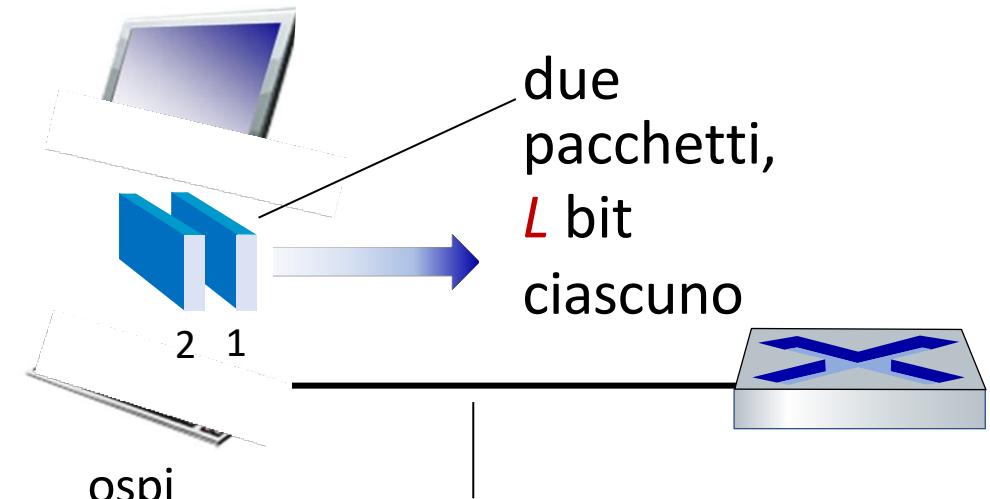
*Per gentile concessione: Massachusetts Green High Performance Computing Center ([mghpcc.org](http://mghpcc.org))*



# Host: invia pacchetti di dati

funzione di invio dell'host:

- prende il messaggio dell'applicazione
- si suddivide in pezzi più piccoli, detti *pacchetti*, di lunghezza  $L$  bit
- trasmette il pacchetto nella rete di accesso alla *velocità di trasmissione  $R$* 
  - velocità di trasmissione del link, alias link<sup>ospi</sup> *capacità, ovvero larghezza di banda del collegamento*  $R$ : velocità di trasmissione del collegamento



trasmissi

on

e dei pacchetti

=

ritardo      tempo necessario  
                per trasmettere il  
                pacchetto L-bit=  
                ne  
I collegamento

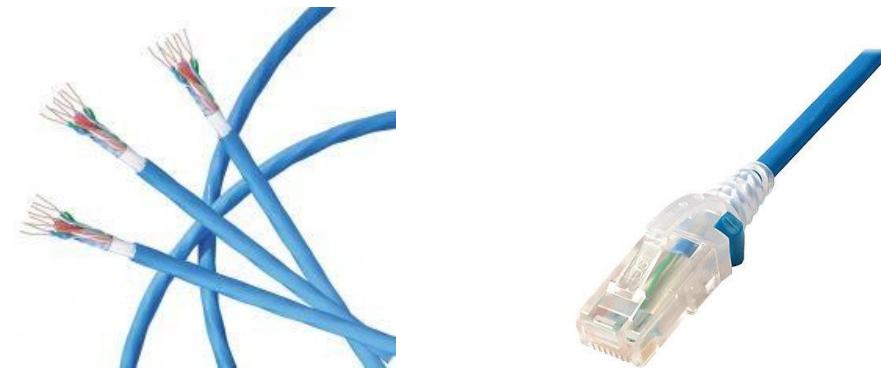
L (bit)  
 $R$  (bit/sec)

# Collegamenti: supporti fisici

- **bit:** si propaga tra le coppie trasmettitore/ricevitore
- **collegamento fisico:** cosa si trova tra trasmettitore e ricevitore
- **media guidati:**
  - i segnali si propagano nei mezzi solidi: rame, fibra, coassiale
- **media non guidati:**
  - segnali si propagano liberamente, come ad esempio i segnali radio

## Coppia ritorta (TP)

- due fili di rame isolati
  - Categoria 5: 100 Mbps, 1 Gbps Ethernet
  - Categoria 6: 10Gbps Ethernet



# Collegamenti: supporti fisici

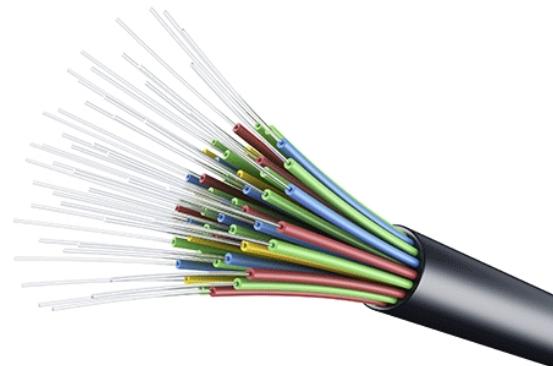
## Cavo coassiale:

- due conduttori di rame concentrici
- bidirezionale
- a banda larga:
  - canali a frequenza multipla sul cavo
  - 100 Mbps per canale



## Cavo in fibra ottica:

- fibra di vetro che trasporta impulsi di luce, ogni impulso un bit
- funzionamento ad alta velocità:
  - punto-punto ad alta velocità trasmissione (10-100 Gbps)
- basso tasso di errore:
  - ripetitori distanziati tra loro
  - immune ai disturbi elettromagnetici



# Collegamenti: supporti fisici

## Radio senza fili

- segnale trasportato in varie "bande" dello spettro elettromagnetico
- nessun "filo" fisico
- trasmissione, "half-duplex" (dal mittente al destinatario)
- effetti dell'ambiente di propagazione:
  - riflessione
  - ostruzione da parte di oggetti
  - Interferenze/rumore

## Tipi di collegamento radio:

- **LAN senza fili (WiFi)**
  - 10-100's Mbps; 10's metri
- **ad ampio raggio** (ad esempio, cellulare 4G/5G)
  - 10's Mbps (4G) su ~10 Km
- **Bluetooth**: sostituzione del cavo
  - distanze brevi, tariffe limitate
- **microonde terrestri**
  - punto-punto; canali a 45 Mbps
- **satellite**
  - fino a < 100 Mbps (Starlink) in downlink

- 270 msec di ritardo finale  
(geostazionario)

# Introduzione

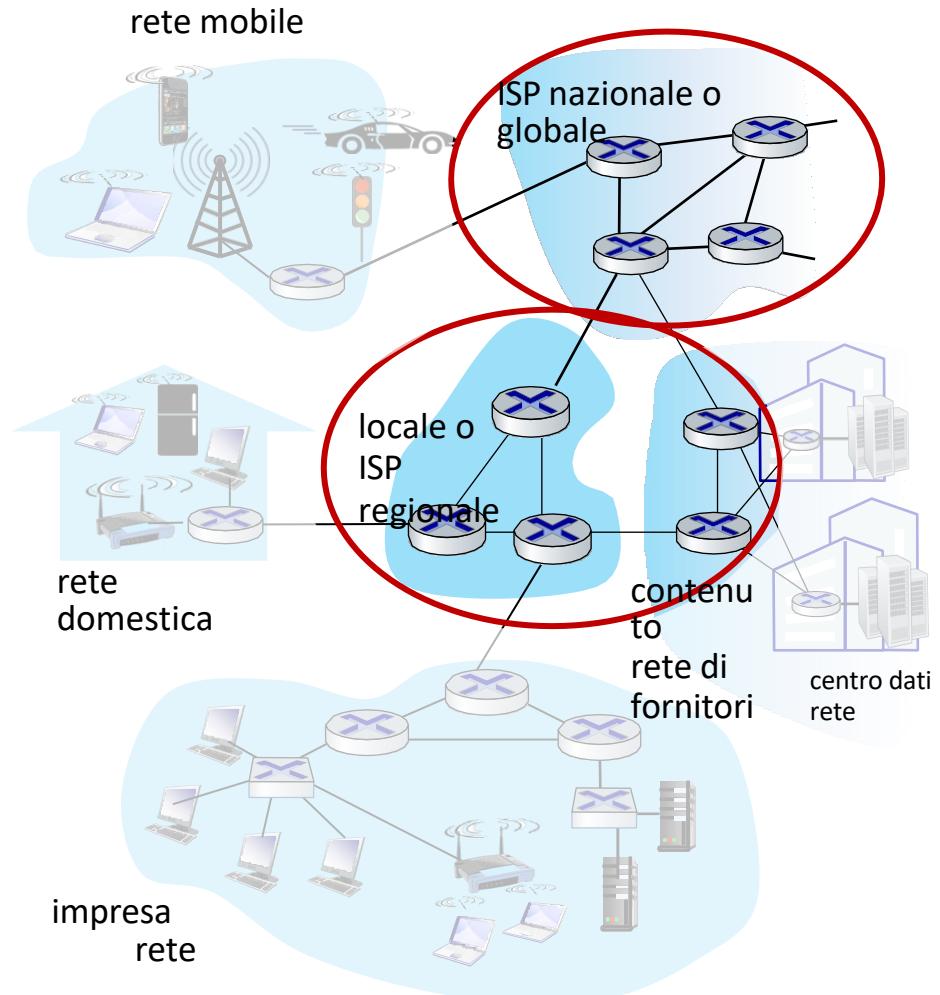
- Che cos'è Internet?
- Che cos'è un protocollo?
- Bordo della rete: host, rete di accesso, supporti fisici
- **Nucleo della rete:**  
commutazione di  
pacchetto/circuito,  
struttura Internet
- Prestazioni: perdita, ritardo, throughput
- Sicurezza



- Livelli di protocollo, modelli di servizio
- La storia

# Il nucleo della rete

- rete di router interconnessi
- **commutazione di pacchetto:** gli host suddividono i messaggi del livello applicazione in *pacchetti*
  - La rete **inoltra** i pacchetti da un router all'altro, attraverso i collegamenti sul percorso dalla sorgente alla destinazione.



# Due funzioni chiave della rete

appropriato

algoritmo di routing

## Inoltro:

- alias  
"commutazione"
- azione *locale*:  
spostare i  
pacchetti in  
arrivo da  
il link di ingresso  
del router al link  
di uscita del  
router

tabella di inoltro  
locale

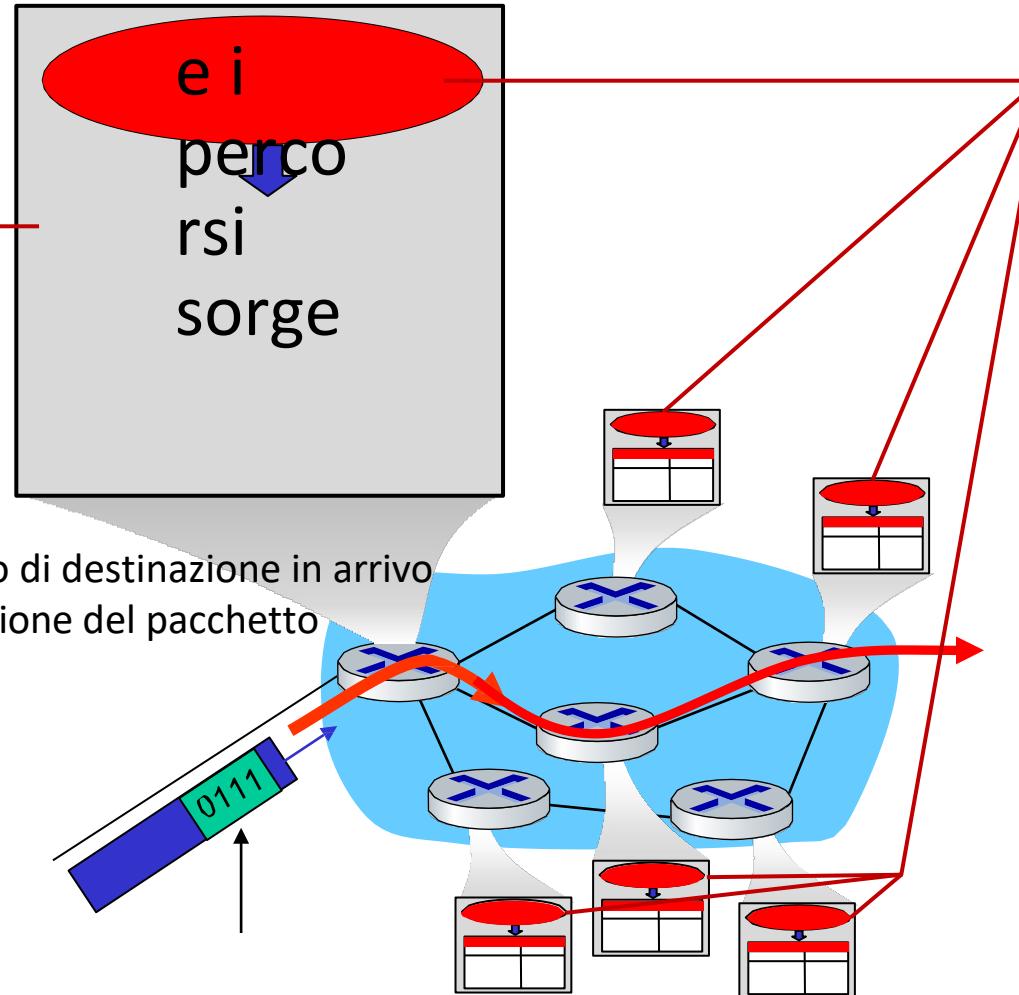
tabella di inoltro locale	
valore dell'intestazio ne	collegame nto in uscita
0100	3
0101	2
0111	2
1001	1

1

3 2

## Instradamento:

- azione *globale*: determinar



- nte-destinazione seguiti dai pacchetti
- algoritmi di routing

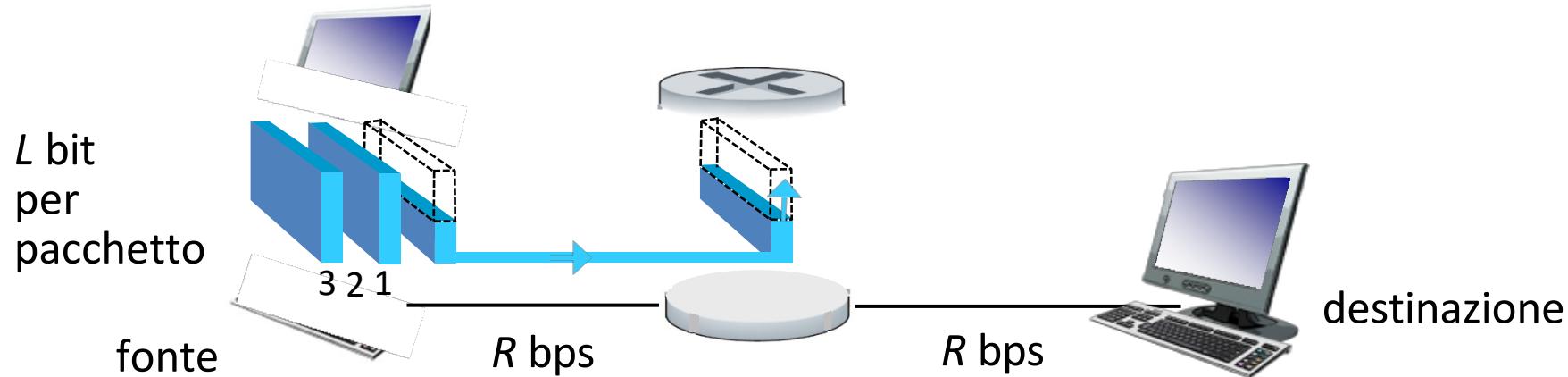




inoltro

inoltro

# Commutazione di pacchetto: store-and-forward

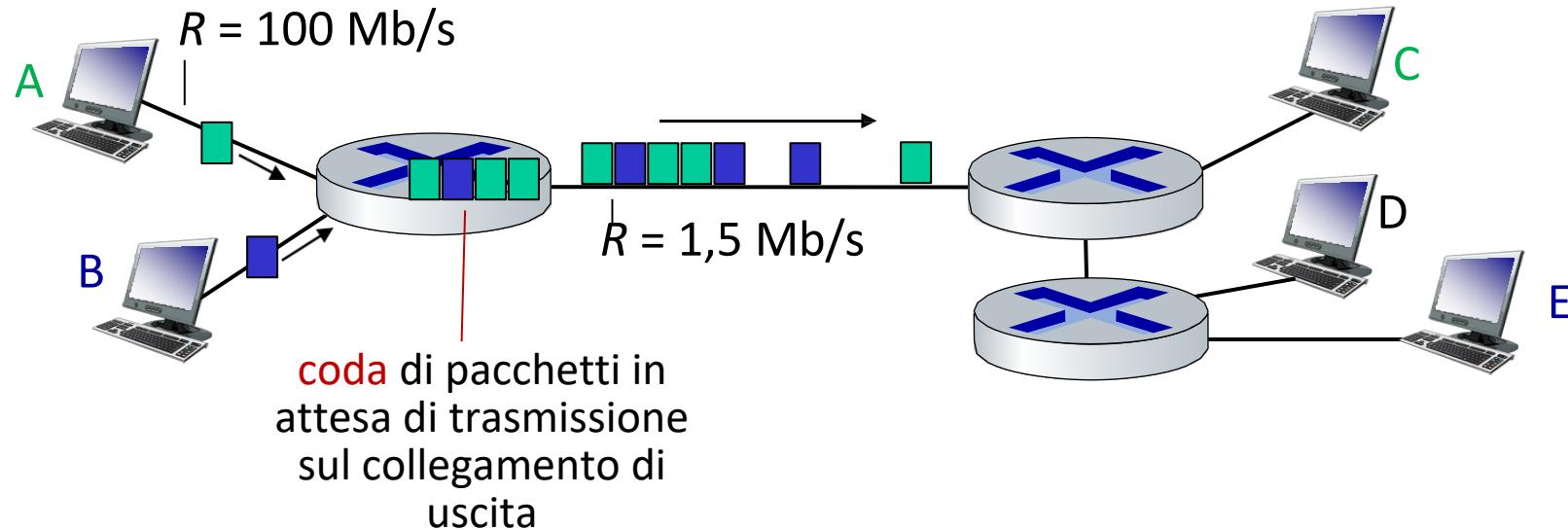


- **Ritardo di trasmissione del pacchetto:** impiega  $L/R$  secondi per trasmettere (inviare) un pacchetto di  $L$  bit nel collegamento a  $R$  bps.
- ***store and forward*:** l'intero pacchetto deve arrivare al router prima di poter essere trasmesso sul collegamento successivo

*Esempio numerico a una via:*

- $L = 10 \text{ Kbit}$
- $R = 100 \text{ Mbps}$
- ritardo di trasmissione one-hop  
= 0,1 msec

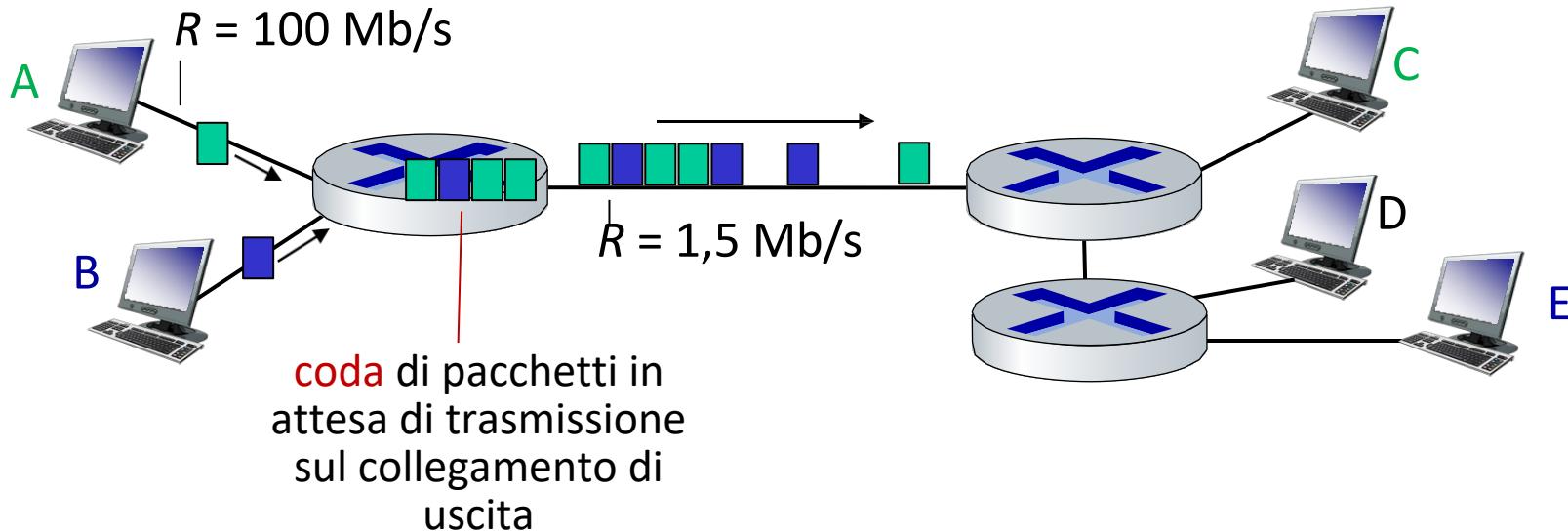
# Commutazione dei pacchetti: accodamento



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



# Commutazione dei pacchetti: accodamento



**Accodamento e perdita di pacchetti:** se la velocità di arrivo (in bps) al collegamento supera la velocità di trasmissione (bps) del collegamento per un certo periodo di tempo:

- i pacchetti vengono messi in coda, in attesa di essere trasmessi sul

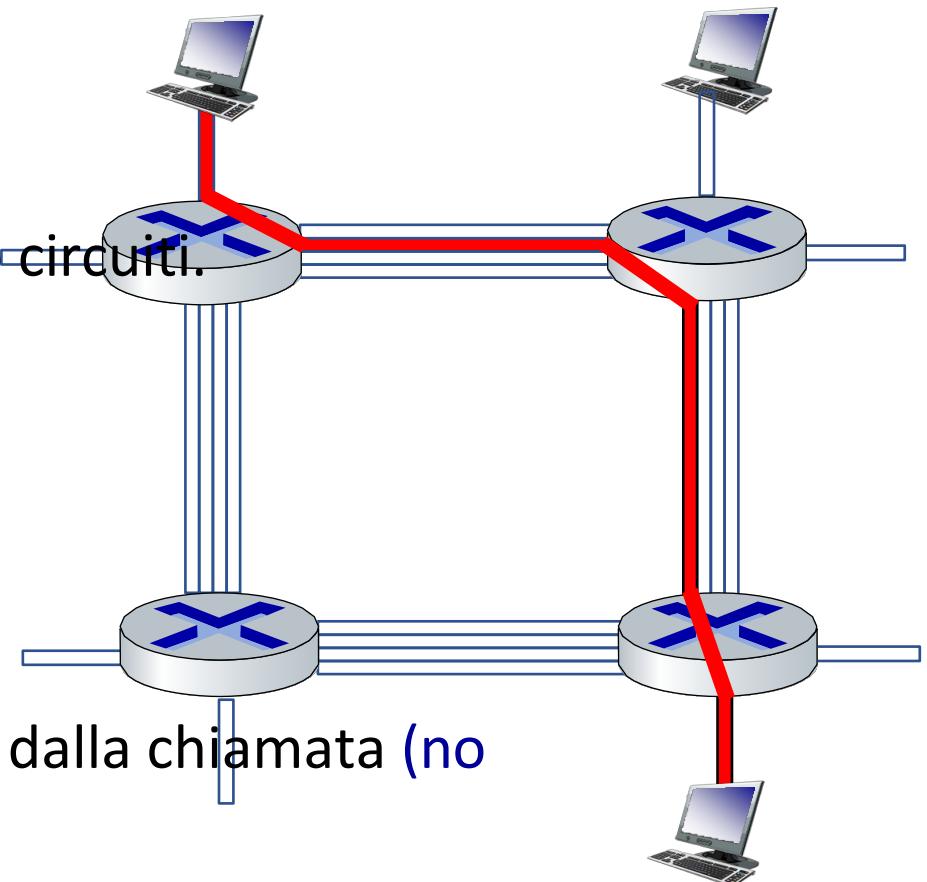
## collegamento di uscita

- I pacchetti possono essere abbandonati (persi) se la memoria (buffer) del router si riempie.

# Alternativa alla commutazione di pacchetto: la commutazione di circuito

risorse finali assegnate,  
riservato alla "chiamata" tra sorgente  
e destinazione

- nel diagramma, ogni collegamento ha quattro circuiti.
  - la chiamata ottiene 2 circuiti<sup>nd</sup> nel link superiore e 1 circuito<sup>st</sup> nel link destro.
- risorse dedicate: nessuna condivisione
  - prestazioni di tipo circuitale (garantite)
- segmento di circuito inattivo se non utilizzato dalla chiamata (**no condivisione**)



- comunemente utilizzati nelle reti telefoniche tradizionali

\* Per ulteriori esempi, consultate gli esercizi interattivi online: [http://gaia.cs.umass.edu/kurose\\_ross/interactive](http://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/interactive).

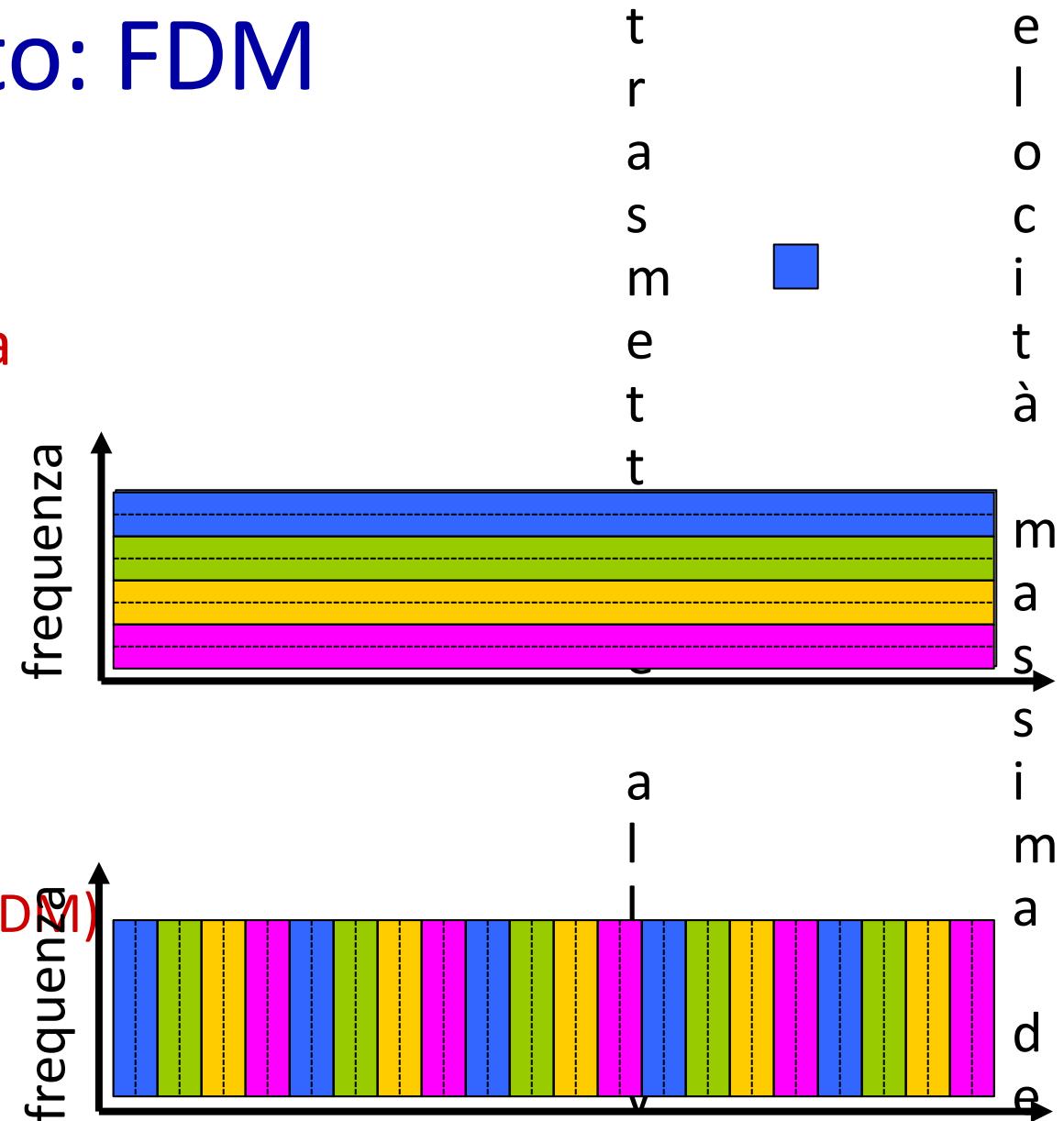
# Commutazione di circuito: FDM e TDM

## Multiplazione a divisione di frequenza (FDM)

- ottico, frequenze elettromagnetiche suddivise in bande di frequenza (strette)
- Ogni chiamata ha una propria banda, può trasmettere alla velocità massima di quella banda ristretta.

## Multiplazione a divisione di tempo (TDM)

- tempo suddiviso in slot
- ogni chiamata a cui sono stati assegnati slot periodici, può



lla banda di frequenza (più ampia)  
(solo) durante i suoi slot temporali

4



utenti

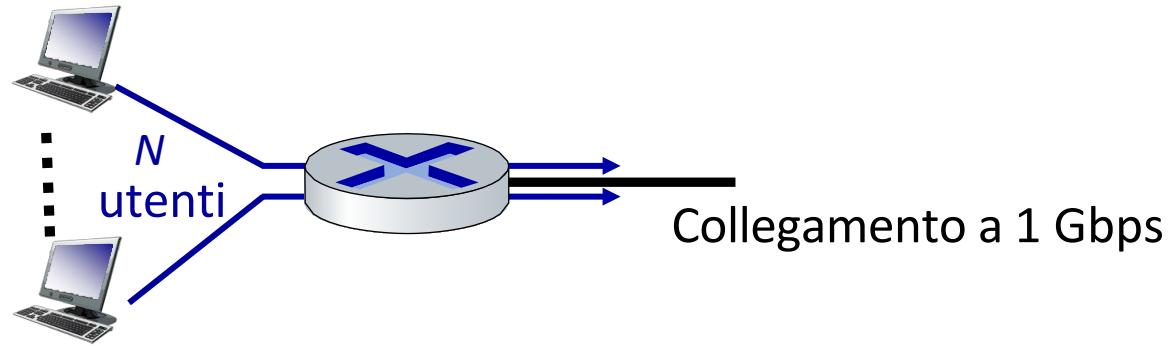
*tempo*

*tempo*

# Commutazione di pacchetto e commutazione di circuito

esempio:

- Collegamento a 1 Gb/s
- ogni utente:
  - 100 Mb/s quando "attivo"
  - attivo il 10% del tempo



*D:* Quanti utenti possono utilizzare questa rete con commutazione di circuito e commutazione di pacchetto?

- *commutazione di circuito:* 10 utenti
- *commutazione di pacchetto:* con 35

utenti, la probabilità > 10 attivi nello stesso momento è inferiore a .0004 \*

\* Per ulteriori esempi, consultare gli esercizi interattivi online: [http://gaia.cs.umass.edu/kurose\\_ross/interactive](http://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/interactive)

# Commutazione di pacchetto e commutazione di circuito

Il packet switching è un "vincitore assoluto"?

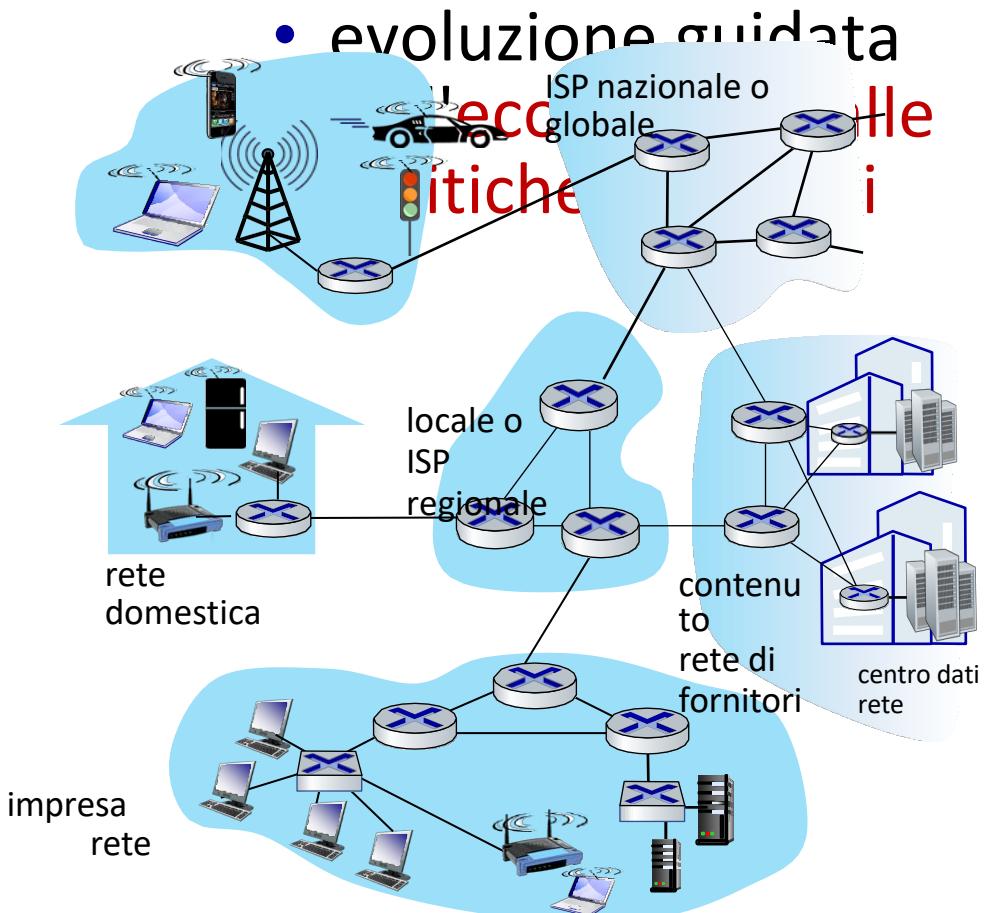
- ottimo per i dati "a raffica" - a volte ha dati da inviare, ma altre volte no
  - condivisione delle risorse
  - più semplice, senza impostazione della chiamata
- possibile congestione eccessiva: ritardo e perdita di pacchetti a causa dell'overflow del buffer
  - protocolli necessari per il trasferimento affidabile dei dati, il controllo della congestione e il controllo del traffico.
- *D: Come fornire un comportamento simile a quello di un circuito con il packet-switching?*
  - "È complicato". Studieremo varie tecniche che cercano di rendere la

commutazione di pacchetto il più possibile "simile a un circuito".

**D:** Analogie umane tra risorse riservate (commutazione di circuito) e allocazione su richiesta (commutazione di pacchetto)?

# Struttura di Internet: una "rete di reti"

- Gli host si collegano a Internet tramite i fornitori di servizi Internet (ISP).
- gli ISP di accesso devono a loro volta essere interconnessi
  - in modo che due host *qualsiasi* (*ovunque!*) possono inviare pacchetti l'uno all'altro
- La rete di reti che ne risulta è molto complessa

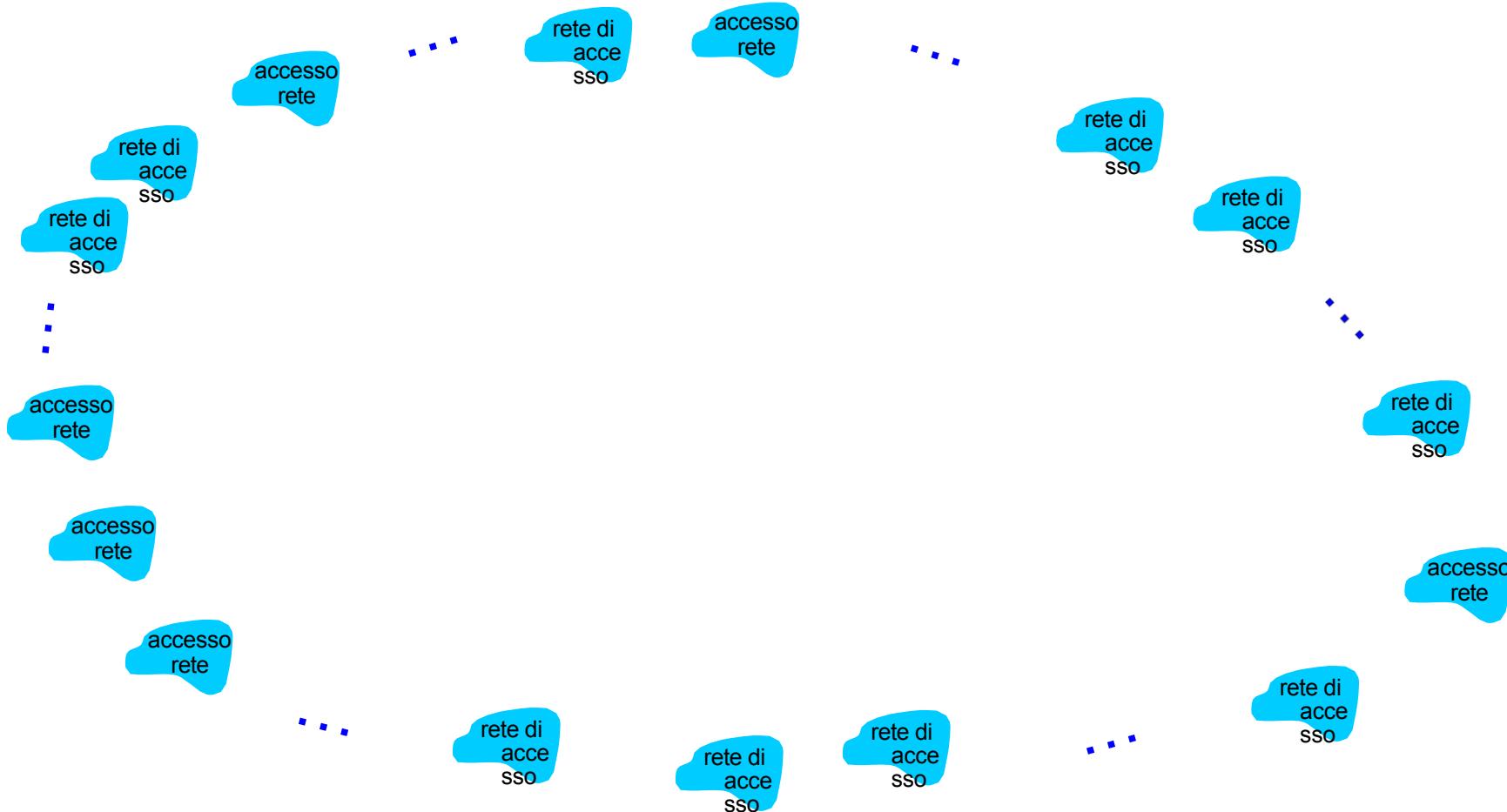


rete mobile

*Vediamo un approccio graduale per descrivere l'attuale struttura di Internet.*

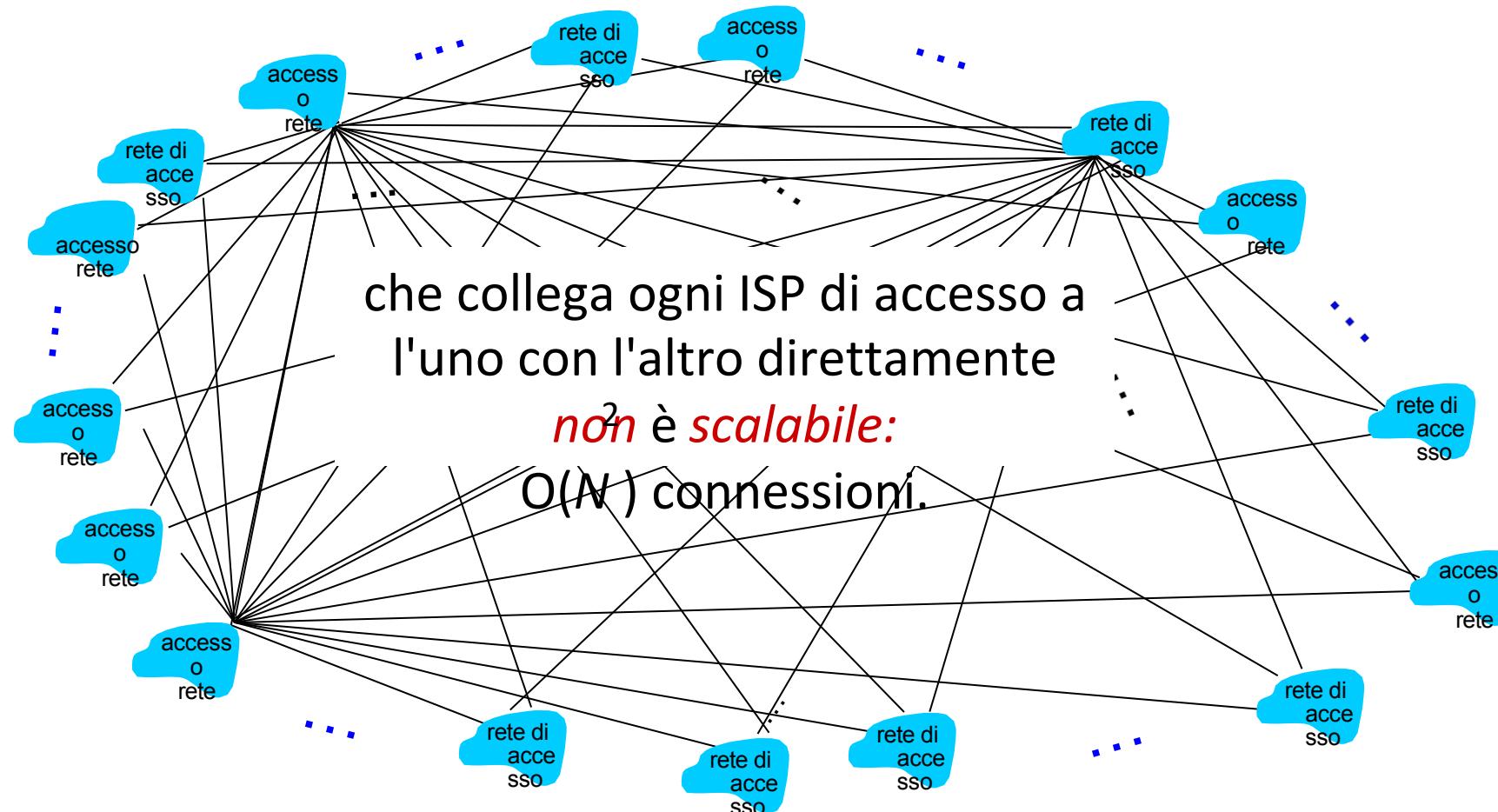
# Struttura di Internet: una "rete di reti"

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



# Struttura di Internet: una "rete di reti"

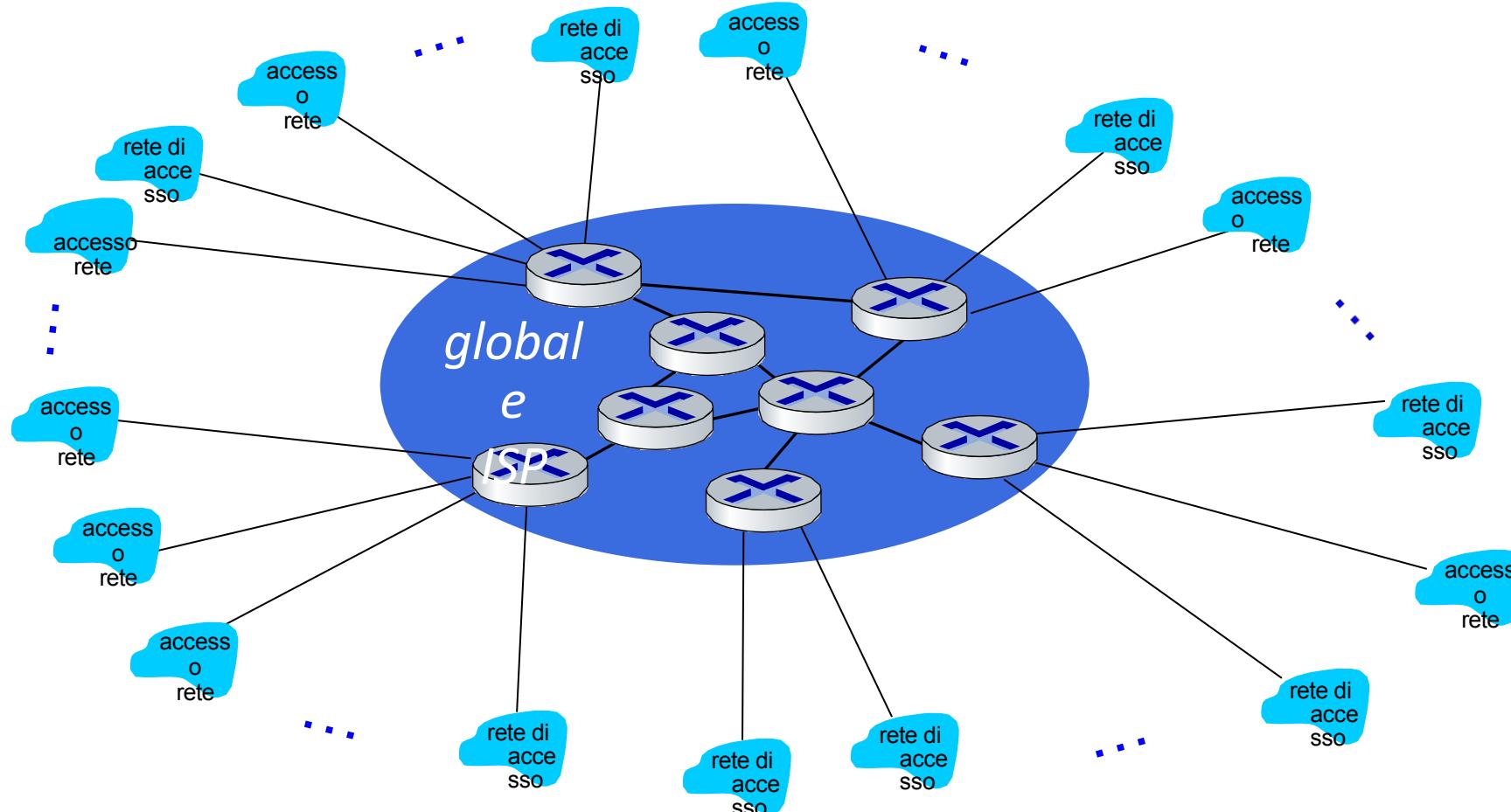
*Domanda:* dati *milioni* di ISP di accesso, come collegarli tra loro?



# Struttura di Internet: una "rete di reti"

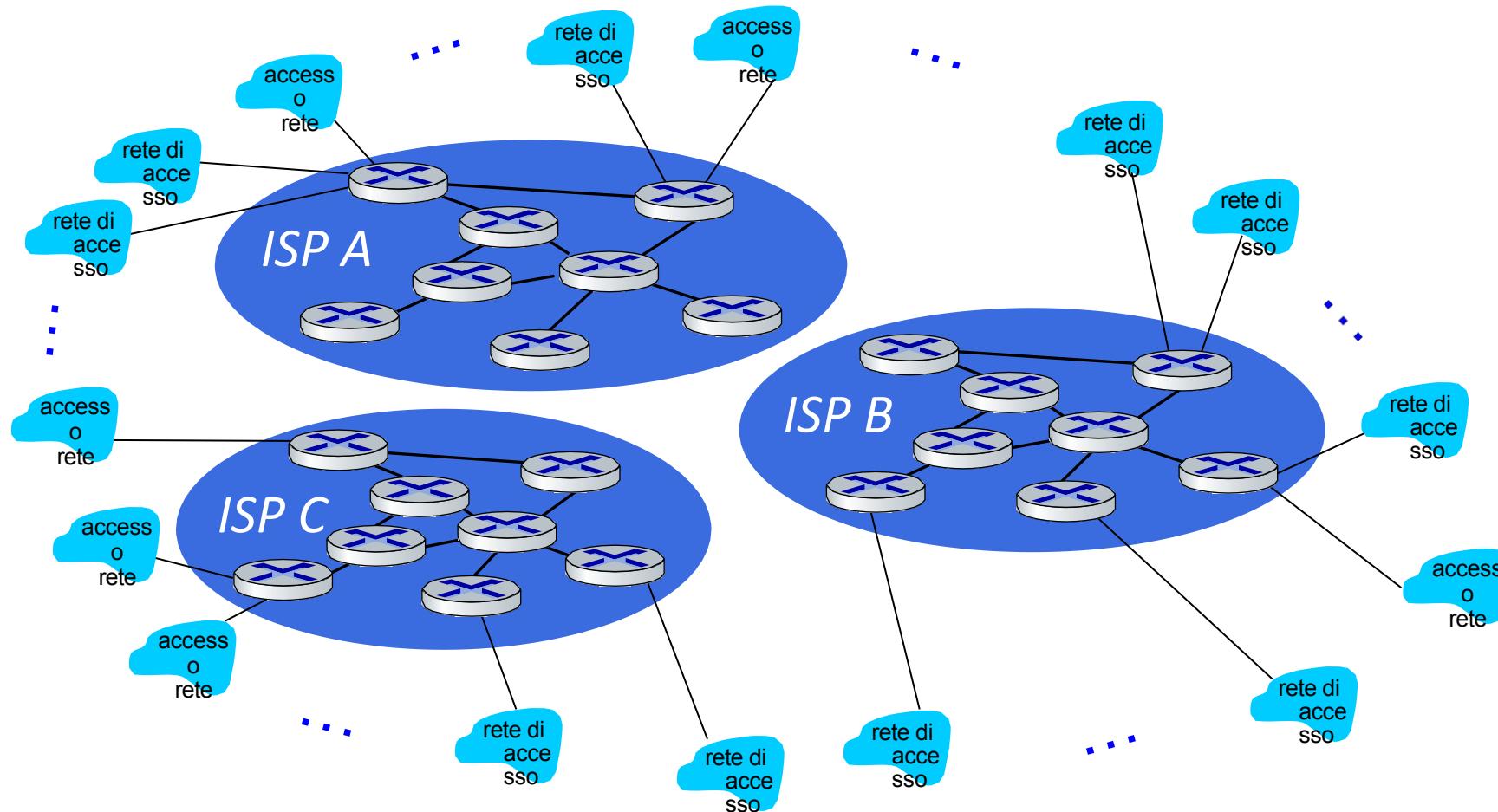
*Opzione: collegare ogni ISP di accesso a un ISP di transito globale?*

*Gli ISP clienti e provider hanno un accordo economico.*



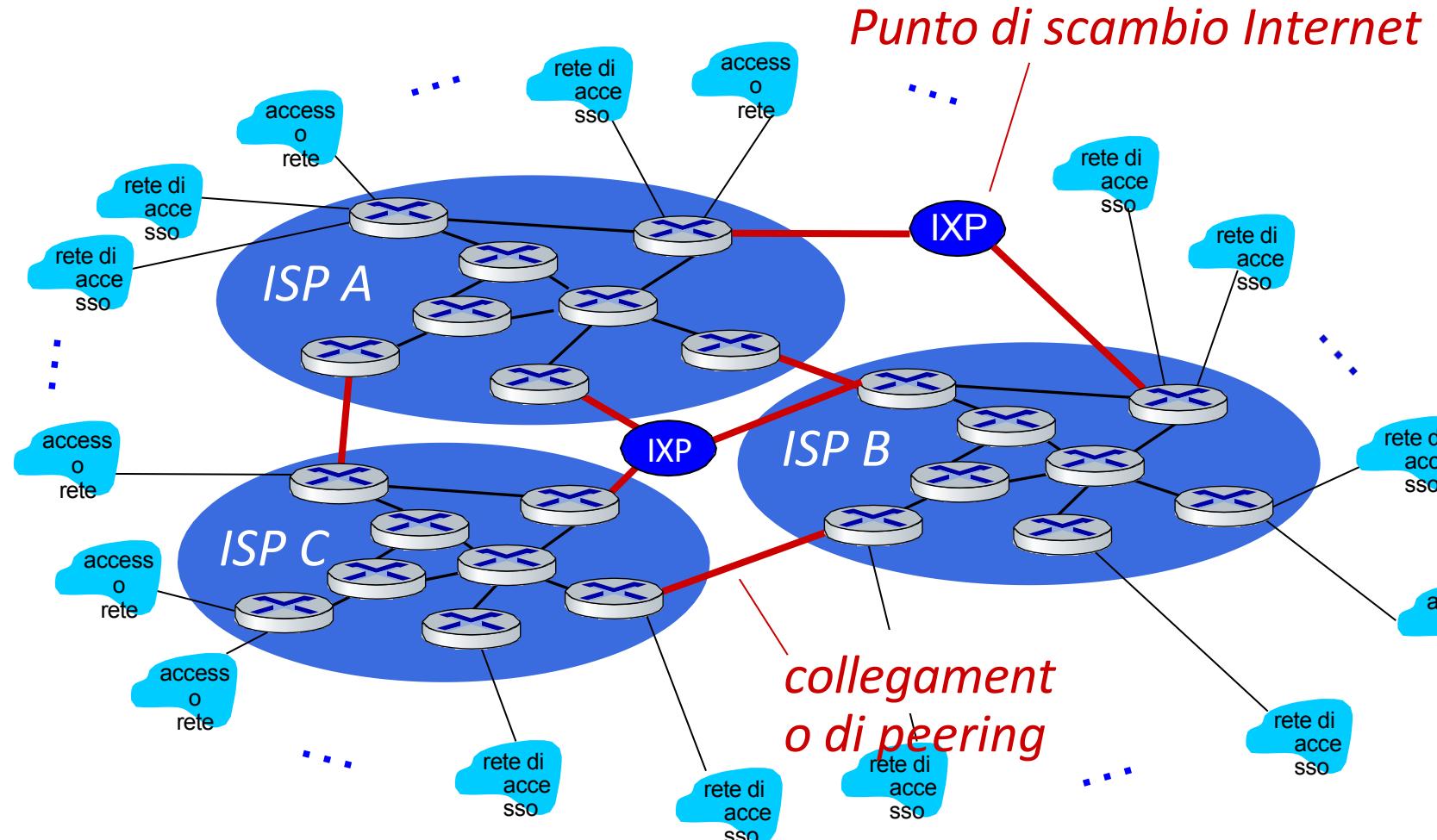
# Struttura di Internet: una "rete di reti"

Ma se un ISP globale è un business redditizio, ci saranno dei concorrenti ....



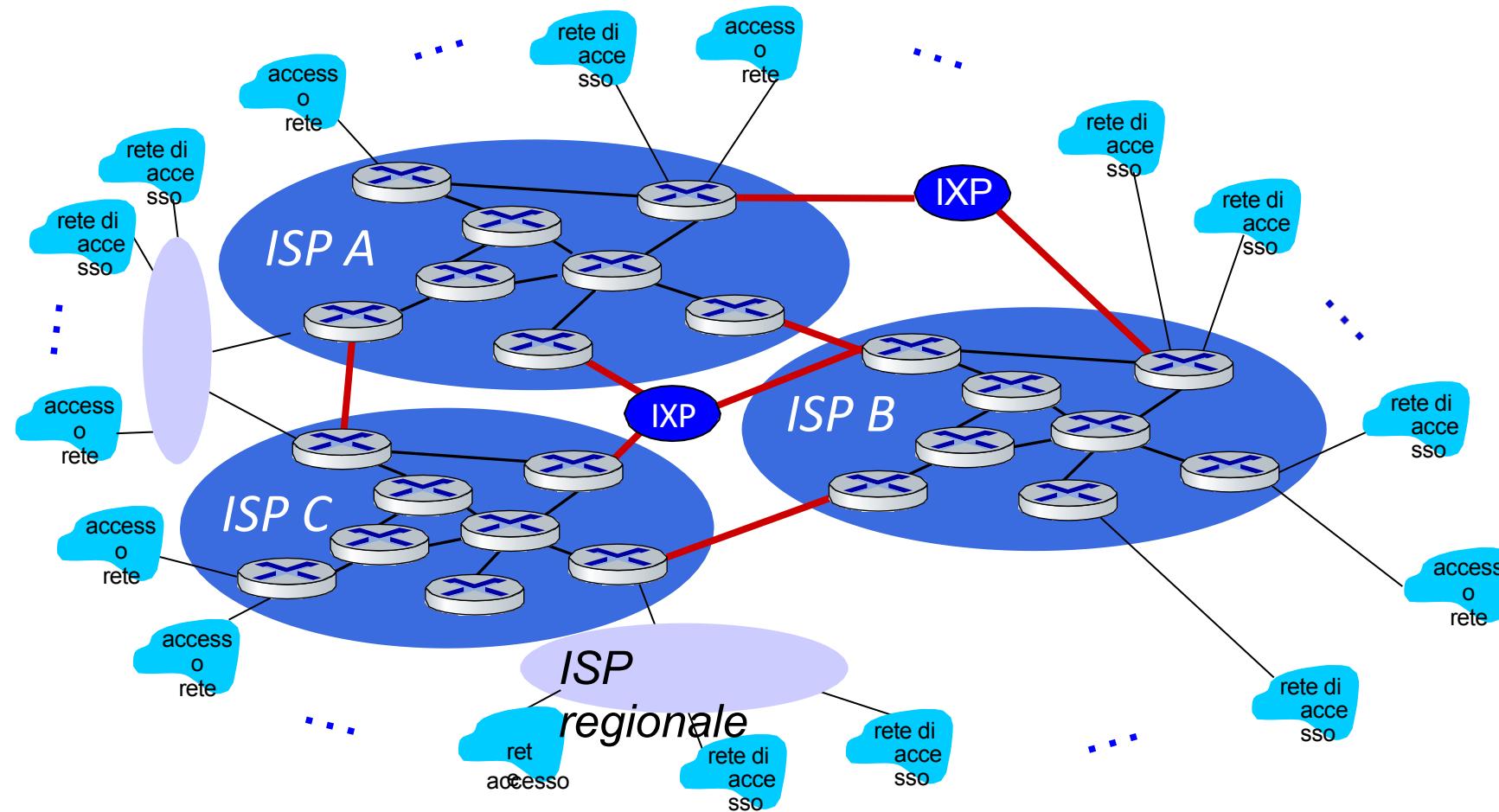
# Struttura di Internet: una "rete di reti"

Ma se un ISP globale è un'attività redditizia, ci saranno dei concorrenti .... che vogliono essere connessi



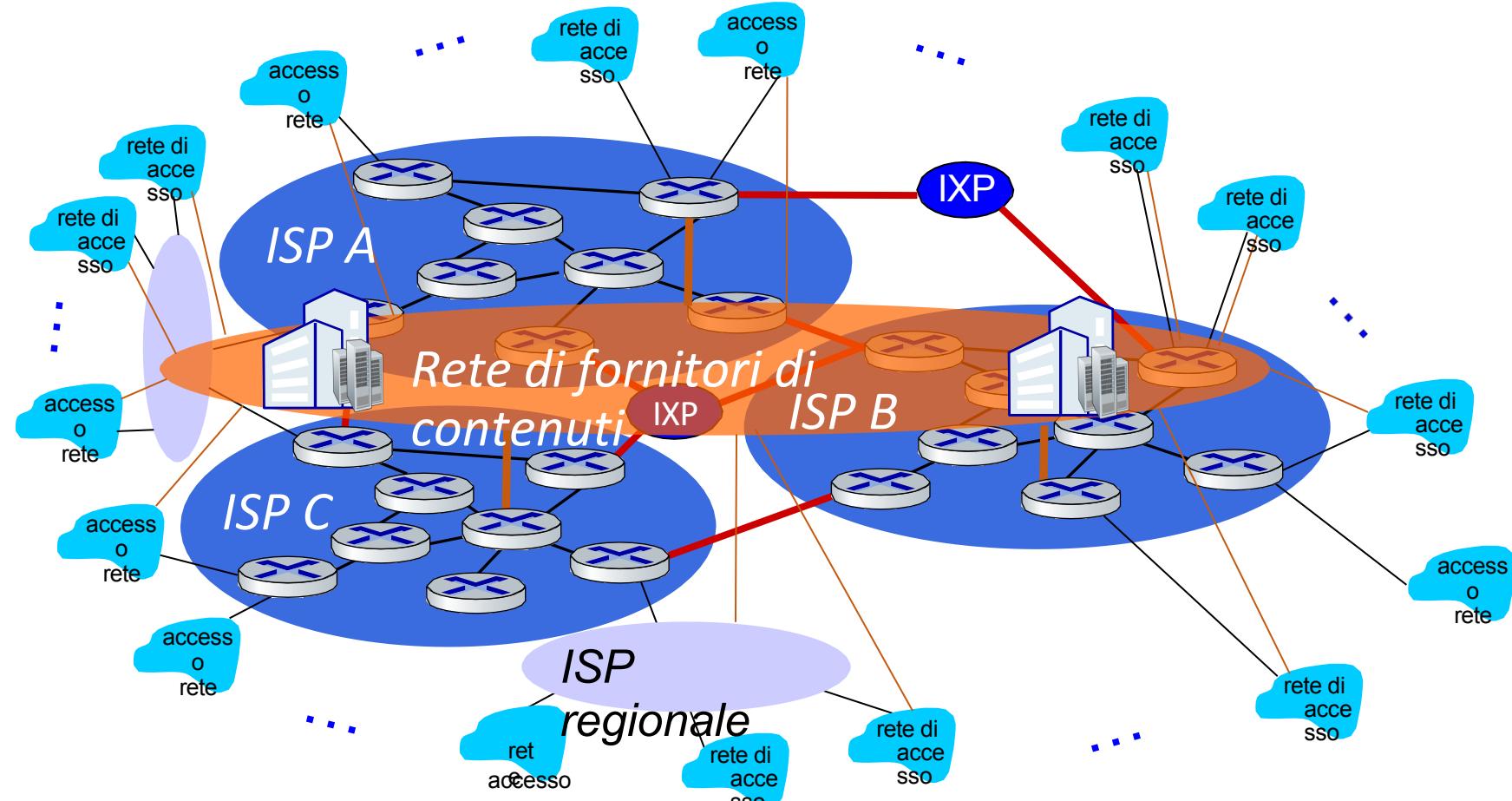
# Struttura di Internet: una "rete di reti"

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

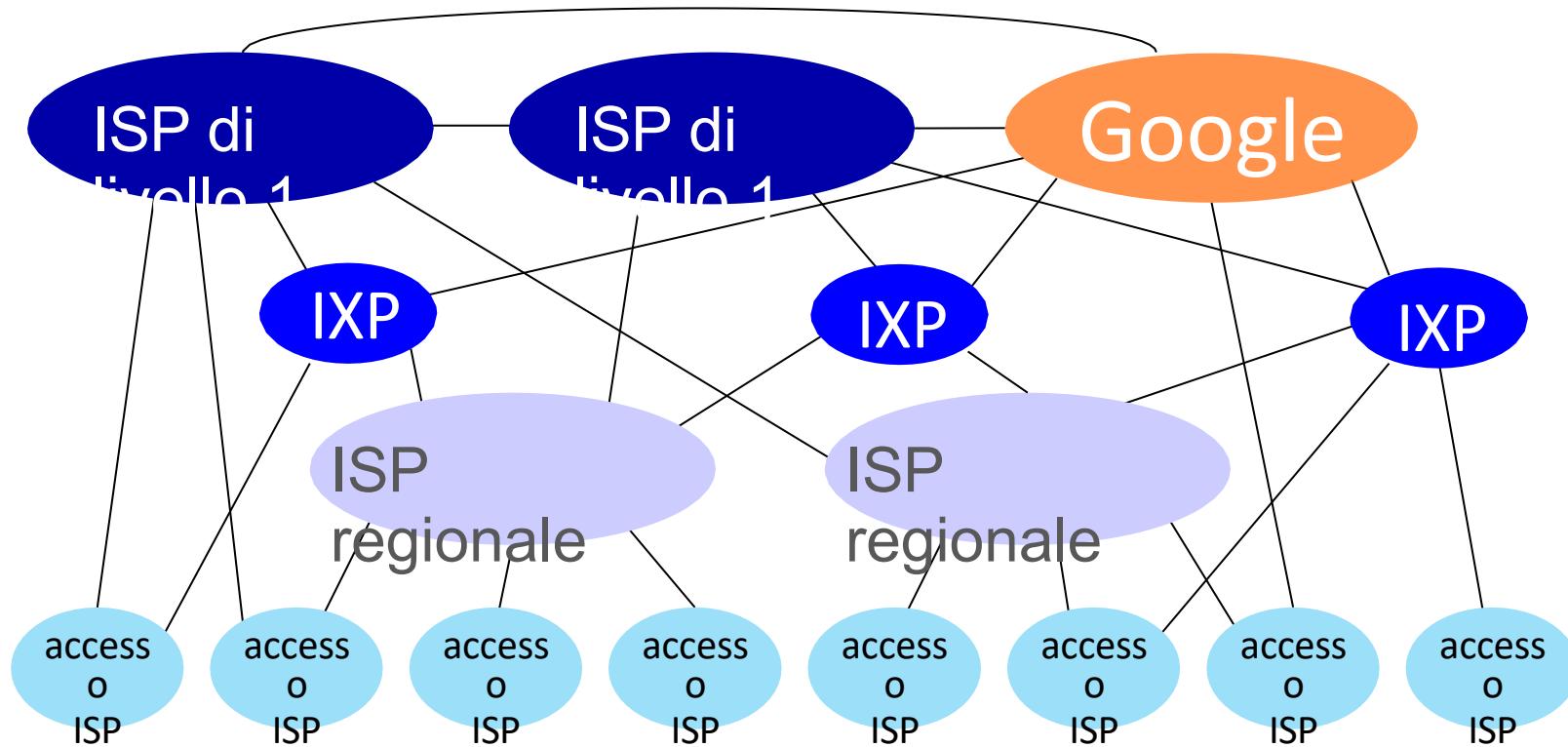


# Struttura di Internet: una "rete di reti"

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



# Struttura di Internet: una "rete di reti"



Al "centro": un piccolo numero di grandi reti ben collegate tra loro

- **ISP commerciali "tier-1"** (ad esempio, Level 3, Sprint, AT&T, NTT), copertura nazionale e internazionale

- **reti di fornitori di contenuti** (ad esempio, Google, Facebook): rete privata che collega i propri centri dati a Internet, spesso bypassando gli ISP regionali di livello 1

# Introduzione

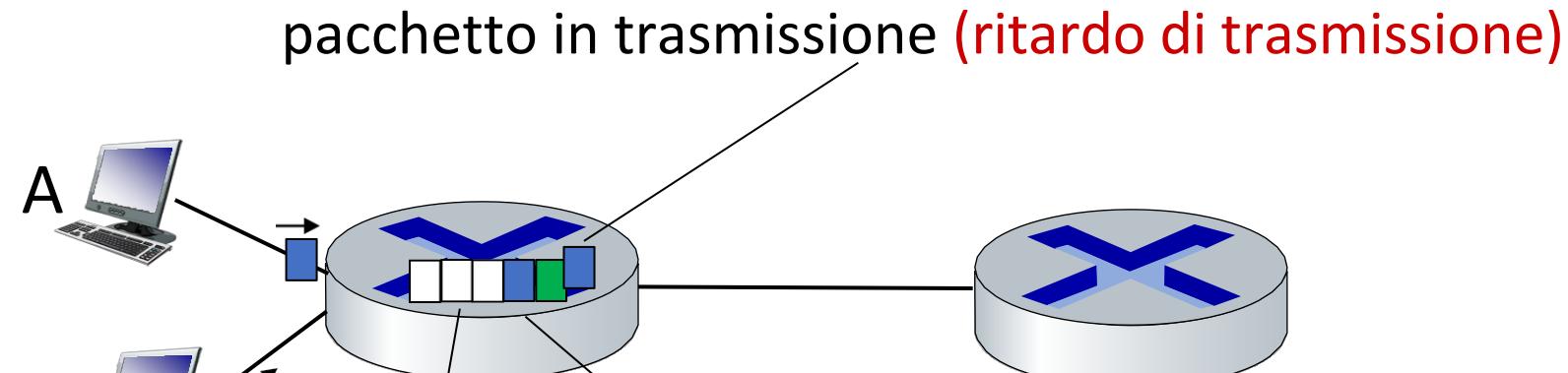
- Che cos'è Internet?
- Che cos'è un protocollo?
- Bordo della rete: host, rete di accesso, supporti fisici
- Nucleo della rete:  
commutazione di pacchetto/circuito,  
struttura di Internet
- Prestazioni: perdita, ritardo, throughput
- Sicurezza



- Livelli di protocollo, modelli di servizio
- La storia

# Come si verificano il ritardo e la perdita dei pacchetti?

- I pacchetti vengono *messi in coda* nei buffer dei router, in attesa del loro turno di trasmissione.
  - La lunghezza della coda cresce quando il tasso di arrivo al link (temporaneamente) supera il link di uscita capacità
- La perdita di pacchetti* si verifica quando la memoria per contenere i pacchetti in coda si riempie



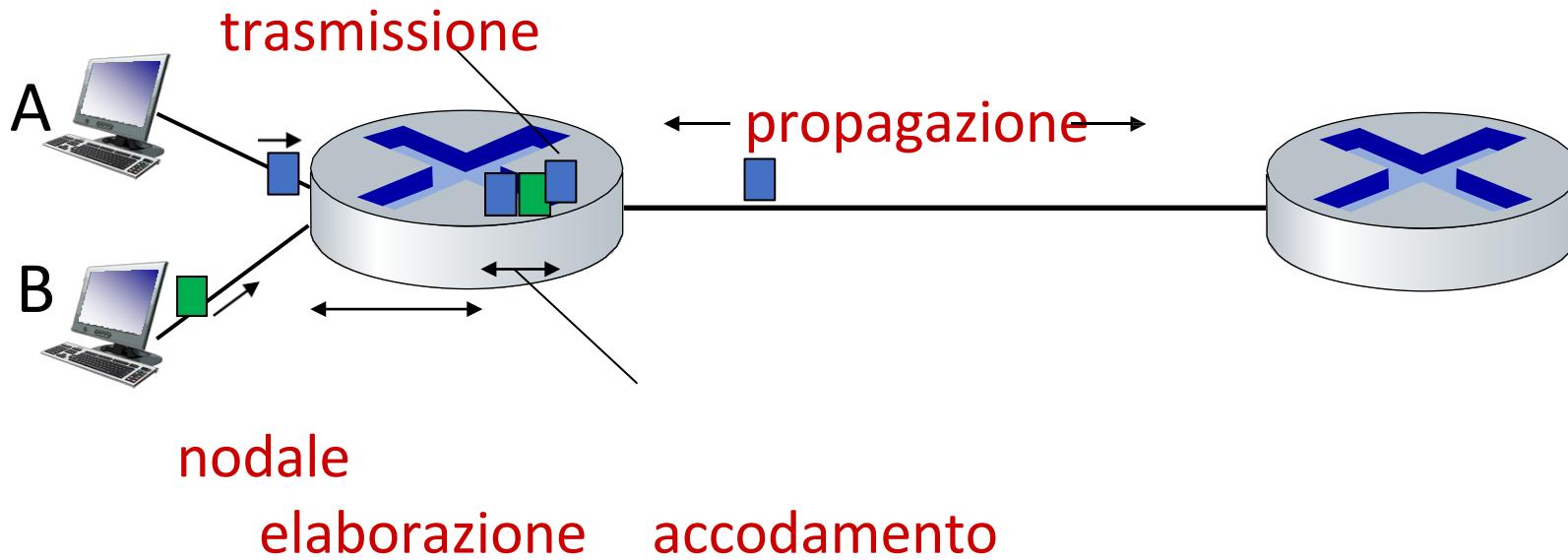
B



pacchetti nei buffer (**ritardo di accodamento**)

buffer liberi (disponibili): pacchetti in arrivo  
abbandonato (**perdita**) se non ci sono buffer liberi

# Ritardo dei pacchetti: quattro fonti



$$d_{\text{nodal}} = d_{\text{proc}} + d_{\text{queue}} + d_{\text{trans}} + d_{\text{prop}}$$

$d_{\text{proc}}$ : elaborazione

nodale

- controllare gli errori di

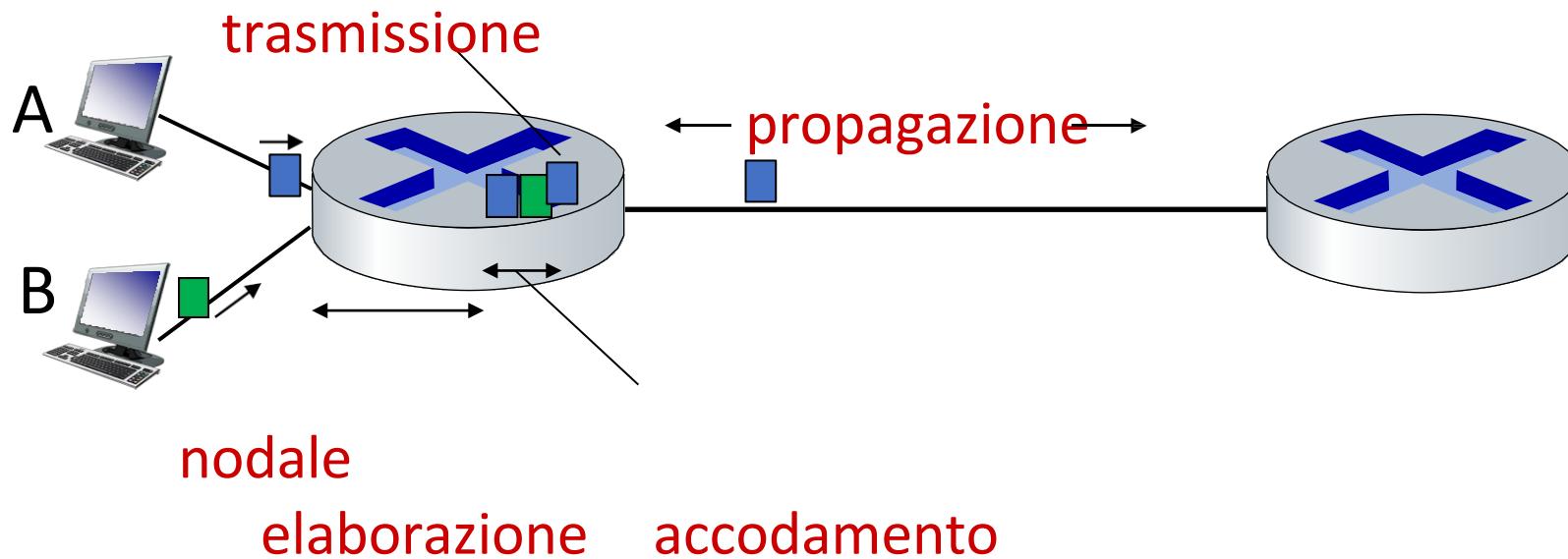
bit

- determinare il collegamento in uscita
- tipicamente < microsec

## dqueue: ritardo di accodamento

- tempo di attesa sul link di uscita per la trasmissione
- dipende dal livello di congestione del router

# Ritardo dei pacchetti: quattro fonti



$$d_{\text{nodal}} = d_{\text{proc}} + d_{\text{queue}} + d_{\text{trans}} + d_{\text{prop}}$$

$d_{\text{trans}}$ : ritardo di trasmissione:

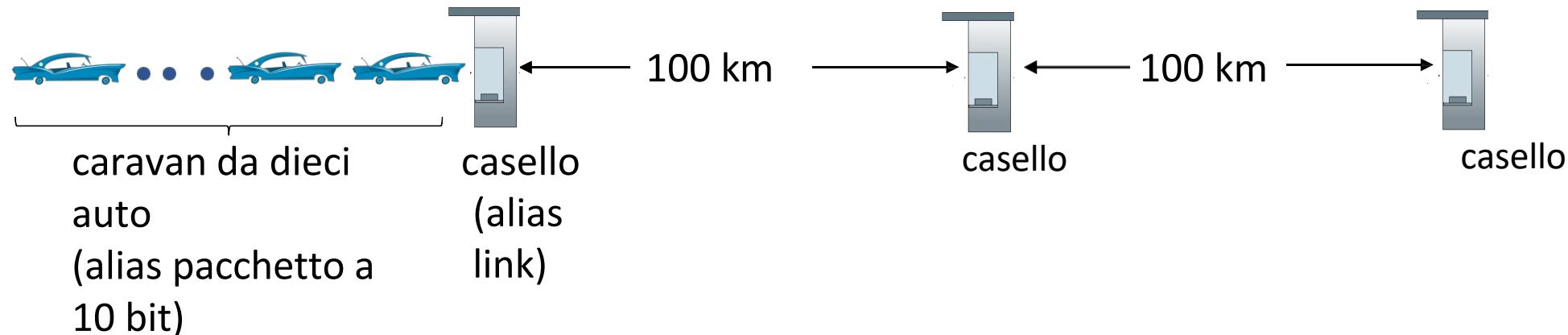
- $L$ : lunghezza del pacchetto (bit)
- $R$ : velocità di trasmissione del collegamento ( $\text{bps}$ )

$d_{\text{trans}}$  e  $d_{\text{prop}}$  molto diversi

## dprop: ritardo di propagazione:

- $d$ : lunghezza del collegamento fisico
- $s$ : velocità di propagazione ( $\sim 2 \times 10^8$  m/sec)
- $d_{\text{prop}} = d/s$

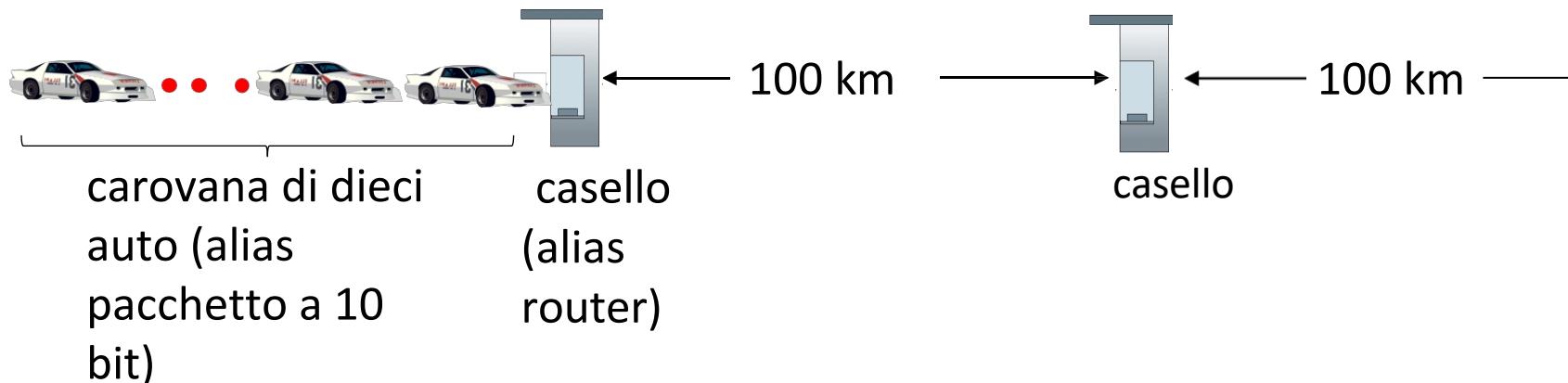
# Analogia con la roulette



- auto ~ bit; caravan ~ pacchetto; servizio di pedaggio ~ trasmissione di link
- Il casellante impiega 12 secondi per la manutenzione dell'auto (tempo di trasmissione dei bit).
- "propagarsi" a 100 km/h
- *D: Quanto tempo ci vuole prima che la carovana si metta in fila davanti al secondo casello?*

- tempo per "spingere" l'intera carovana attraverso il casello sull'autostrada =  $12*10 = 120$  sec.
- tempo di propagazione dell'ultimo veicolo dal 1° al 2° pedaggio:  
 $100\text{km}/(100\text{km/h}) = 1$  ora
- A: 62 minuti

# Analogia con la roulette



- supponiamo che le auto ora "si propaghino" a 1000 km/h
- e supponiamo che i casellanti ora impieghino un minuto per servire un'autovettura
- *D: Le auto arriveranno al secondo stand prima di tutte le auto servite dal primo stand?*

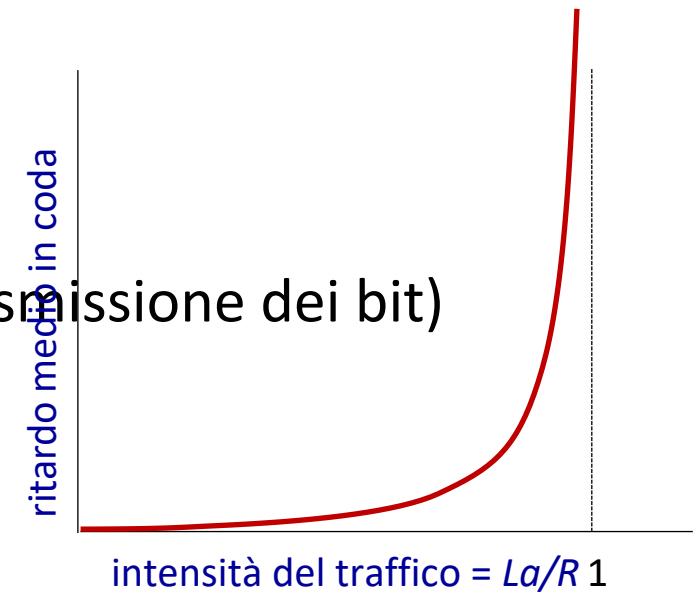
**R: Sì!** Dopo 7 minuti, la prima auto arriva alla seconda cabina; tre auto sono ancora alla prima cabina.

# Ritardo di accodamento dei pacchetti (rivisitato)

- $a$ : tasso medio di arrivo dei pacchetti
- $L$ : lunghezza del pacchetto (bit)
- $R$ : larghezza di banda del collegamento (velocità di trasmissione dei bit)

$$\frac{L \cdot a}{R} : \frac{\text{tasso di arrivo di}}{\text{bit tasso di}} \\ \text{servizio di bit}$$

"intensità del traffico"



- $La/R \sim 0$ : ritardo di coda medio piccolo
- $La/R \rightarrow 1$ : ritardo di coda medio grande

- $La/R > 1$ : più "lavoro" in arrivo è più di quanto possa essere servito

- ritardo medio infinito!



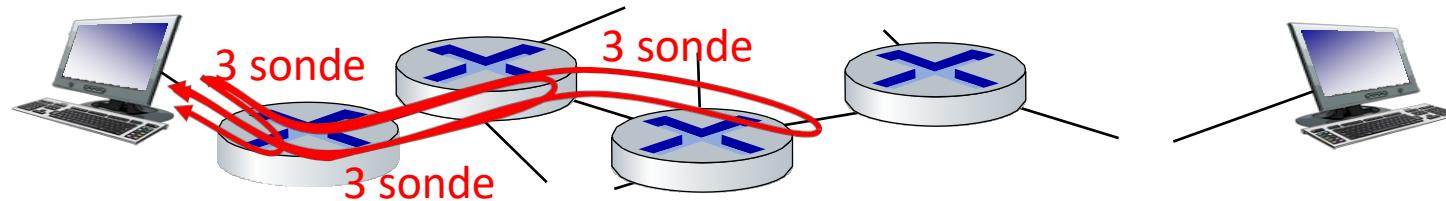
$La/R \sim 0$



$La/R \rightarrow 1$

# "Ritardi e percorsi Internet "reali

- che aspetto hanno i "veri" ritardi e le perdite di Internet?
- programma **traceroute**: fornisce la misura del ritardo dalla sorgente al router lungo il percorso Internet finale verso la destinazione. Per tutti gli  $i$ :
  - invia tre pacchetti che raggiungeranno il router  $i$  sul percorso verso la destinazione (con il valore del campo time-to-live di  $i$ )
  - router  $i$  restituirà i pacchetti al mittente
  - il mittente misura l'intervallo di tempo tra la trasmissione e la risposta



# Ritardi e percorsi Internet reali

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

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

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

collegamento transoceanico

sembra che i ritardi  
diminuire! Perché?

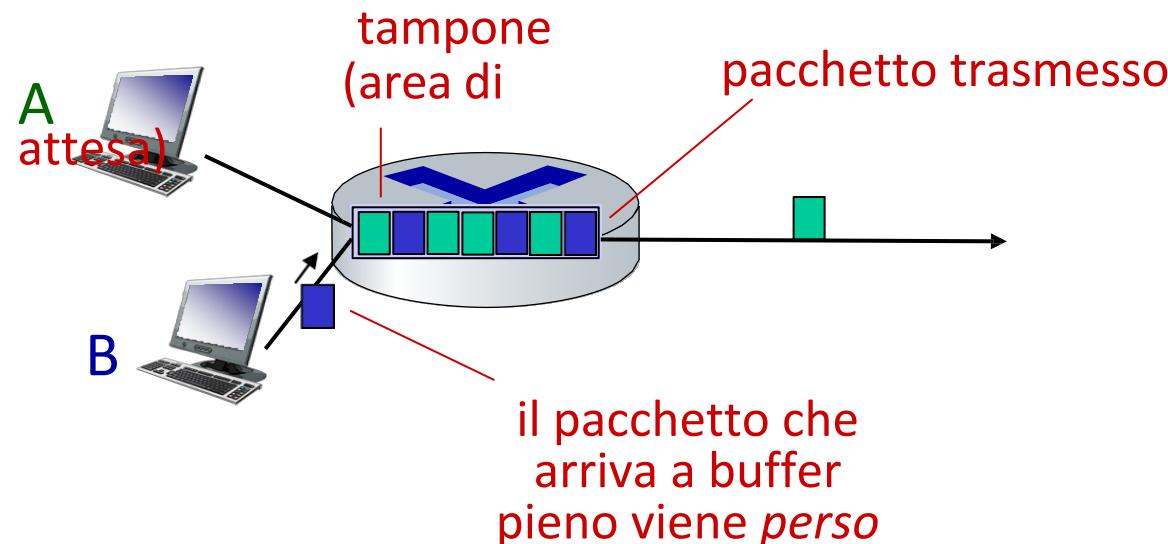
\* significa nessuna risposta (sonda persa, router che non risponde)

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.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

\* Fare alcune tracerout da paesi esotici all'indirizzo [www.traceroute.org](http://www.traceroute.org).

# Perdita di pacchetti

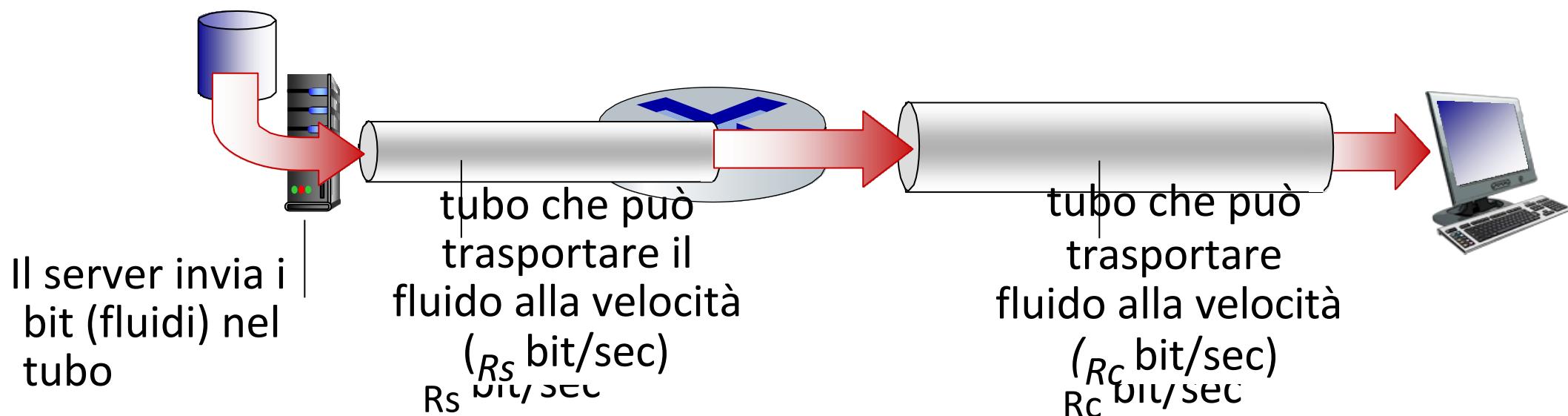
- coda (alias buffer) il collegamento precedente nel buffer ha una capacità finita
- il pacchetto che arriva alla coda piena viene scartato (ovvero perso)
- il pacchetto perso può essere ritrasmesso dal nodo precedente, dal sistema finale della sorgente o non essere ritrasmesso affatto



\* Controllare l'applet Java per un'animazione interattiva (sul sito web dell'editore) dell'accodamento e della perdita.

# Produttività

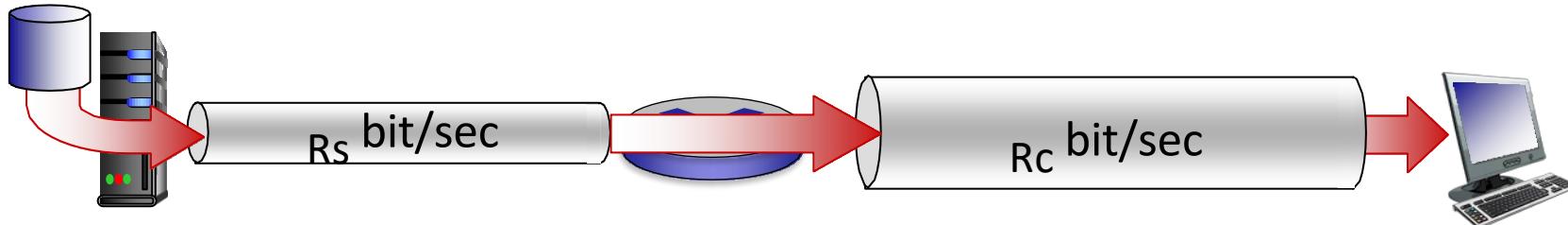
- *throughput*: velocità (bit/unità di tempo) con cui i bit vengono inviati dal mittente al destinatario
  - *istantaneo*: tasso in un determinato momento
  - *media*: tasso su un periodo di tempo più lungo



# Produttività

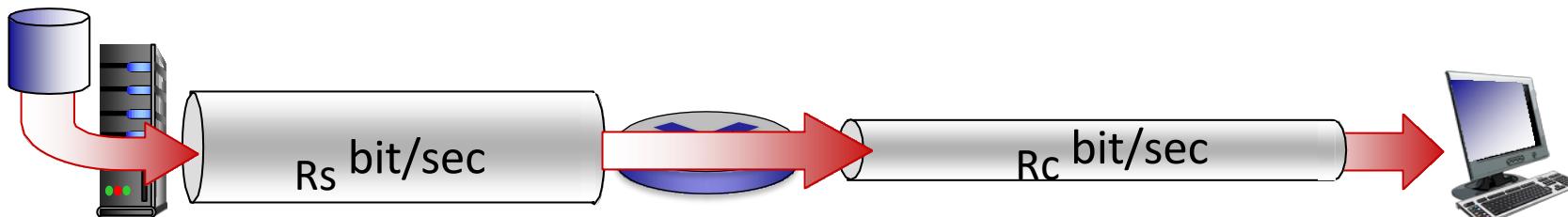
$$R_s < R_c$$

Qual è il throughput finale medio?



$$R_s > R_c$$

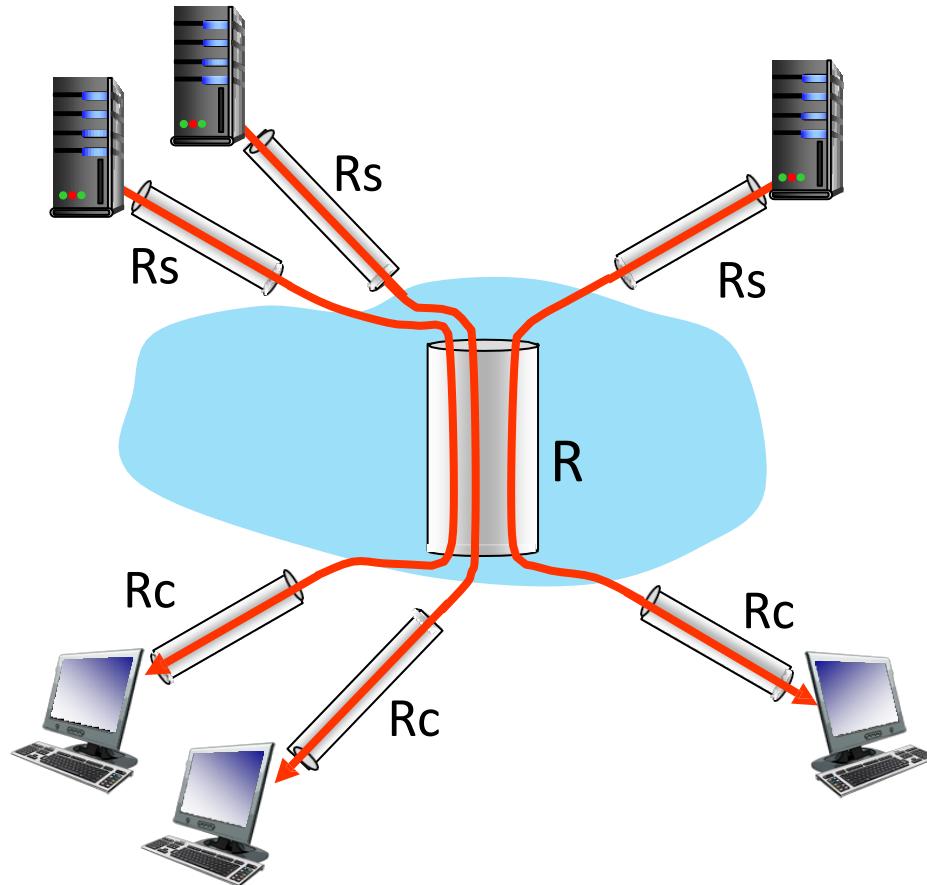
Qual è il throughput finale medio?



*collegamento a collo di bottiglia*

collegamento sul percorso finale che limita il throughput finale

# Throughput: scenario di rete



10 connessioni (in modo equo)

- throughput finale per connessione:  $\min(R_c, R_s) R/10$
  - in pratica:  $R_c$  o  $R_s$  è spesso il collo di bottiglia
- condividono il link del collo di bottiglia della dorsale  $R$  bits/sec

\* Per saperne di più, consultate gli esercizi interattivi online

esempi: [http://gaia.cs.umass.edu/kurose\\_ross/](http://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/)

# Introduzione

- Che cos'è Internet?
- Che cos'è un protocollo?
- Bordo della rete: host, rete di accesso, supporti fisici
- Nucleo della rete:  
commutazione di pacchetto/circuito,  
struttura di Internet
- Prestazioni: perdita, ritardo, throughput
- **Sicurezza**



- Livelli di protocollo, modelli di servizio
- La storia

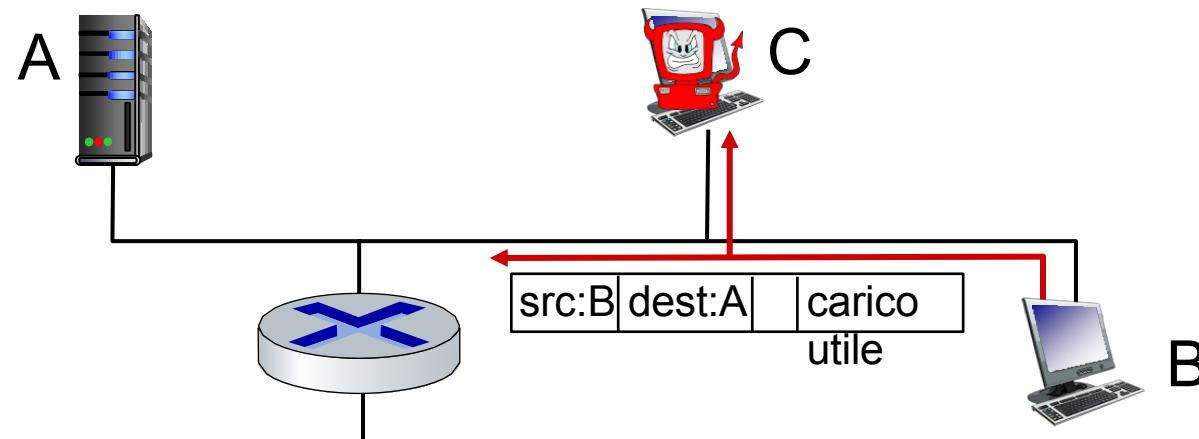
# Sicurezza di rete

- Internet non è stato originariamente progettato pensando alla sicurezza.
  - *visione originale*: "un gruppo di utenti che si fidano reciprocamente e che sono legati ad un rete trasparente" ☺
  - I progettisti di protocolli Internet giocano a rimiattino
  - considerazioni sulla sicurezza in tutti i livelli!
- Ora dobbiamo pensare a:
  - Come i malintenzionati possono attaccare le reti informatiche
  - come possiamo difendere le reti dagli attacchi
  - come progettare architetture immuni agli attacchi

# Cattivi: intercettazione dei pacchetti

*pacchetto "sniffing":*

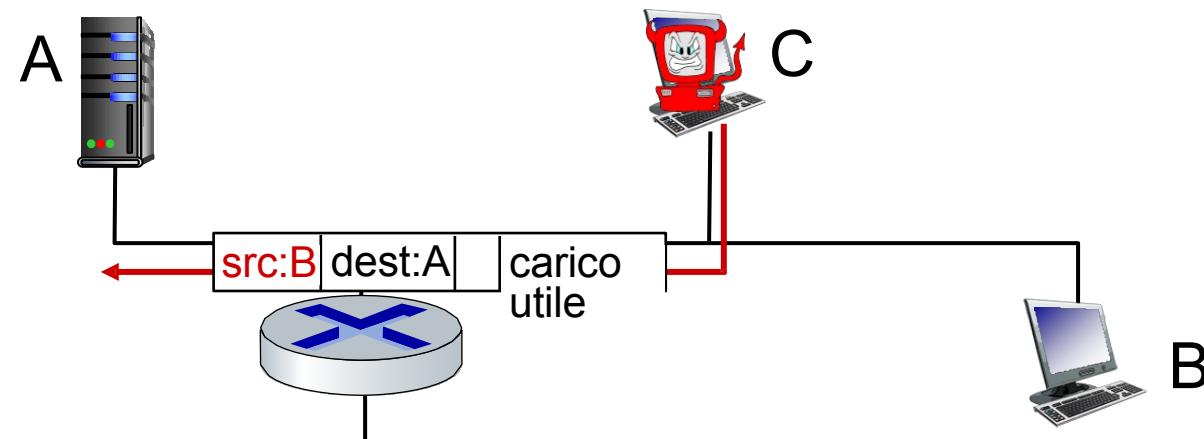
- mezzi di trasmissione (Ethernet condiviso, wireless)
- L'interfaccia di rete promiscua legge/registra tutti i pacchetti (ad esempio, anche le password!) che passano da



Il software Wireshark utilizzato per i laboratori di fine capitolo è un packet-sniffer (gratuito).

# Cattivi: identità false

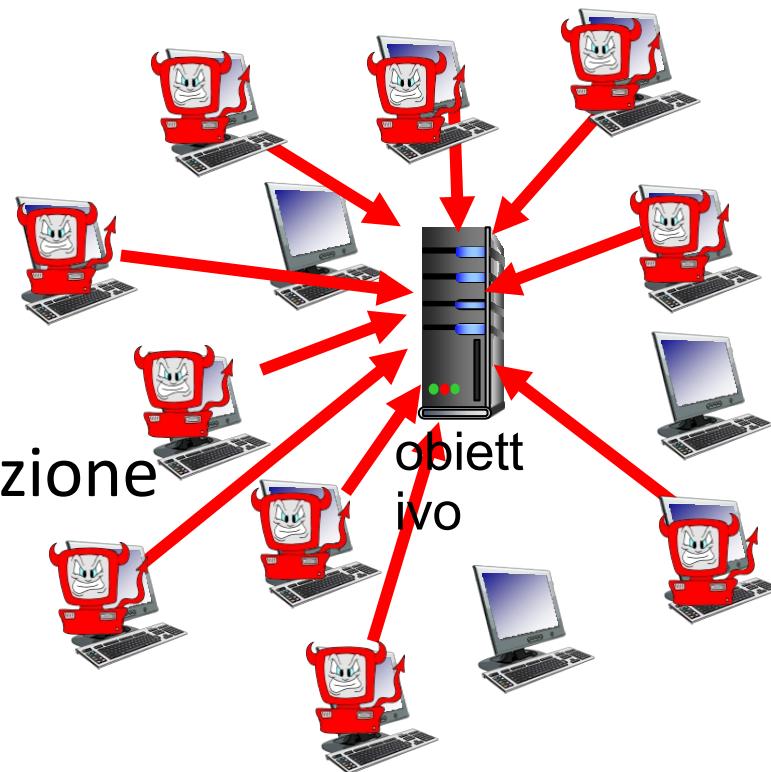
*IP spoofing:* iniezione di pacchetti con indirizzo sorgente falso



# Cattivi: denial of service

*Denial of Service (DoS)*: gli aggressori rendono le risorse (server, larghezza di banda) non disponibili per il traffico legittimo, sovraccaricando le risorse con traffico fasullo.

1. selezionare il target
2. penetrare negli host della rete (vedi botnet)
3. inviare pacchetti alla destinazione da host compromessi



# Linee di difesa:

- **autenticazione:** dimostrare di essere chi si dice di essere
  - Le reti cellulari forniscono un'identità hardware attraverso la carta SIM; in Internet tradizionale non esiste un'assistenza hardware di questo tipo.
- **riservatezza:** tramite crittografia
- **controlli di integrità:** le firme digitali prevengono/rilevano le manomissioni
- **restrizioni di accesso:** VPN protette da password
- **firewall:** "middlebox" specializzati nell'accesso e nel core reti:
  - off-by-default: filtrare i pacchetti in entrata per limitare i mittenti, i destinatari e le applicazioni

- rilevare/reagire agli attacchi DOS

# Introduzione

- Che cos'è Internet?
- Che cos'è un protocollo?
- Bordo della rete: host, rete di accesso, supporti fisici
- Nucleo della rete:  
commutazione di pacchetto/circuito,  
struttura di Internet
- Prestazioni: perdita, ritardo, throughput
- Sicurezza



- Livelli di protocollo, modelli di servizio
- La storia

# Livelli di protocollo e modelli di riferimento

Le reti sono complesse, con molti "pezzi":

- ospiti
- router
- link di vari media
- applicazioni
- protocolli
- hardware, software

*Domanda: c'è* qualche speranza di *organizzare la struttura della rete*?

- e/o la nostra *discussione* di reti?

# Esempio: organizzazione dei viaggi aerei



*trasferimento end-to-end di persona e bagaglio*

biglietto  
(acquisto)  
bagagli (check)  
cancelli (carico)  
pista di decollo  
rotta dell'aereo

biglietto  
(reclamo)  
bagaglio (ritiro)  
gate (scarico)  
pista di  
atterraggio  
rotta dell'aereo

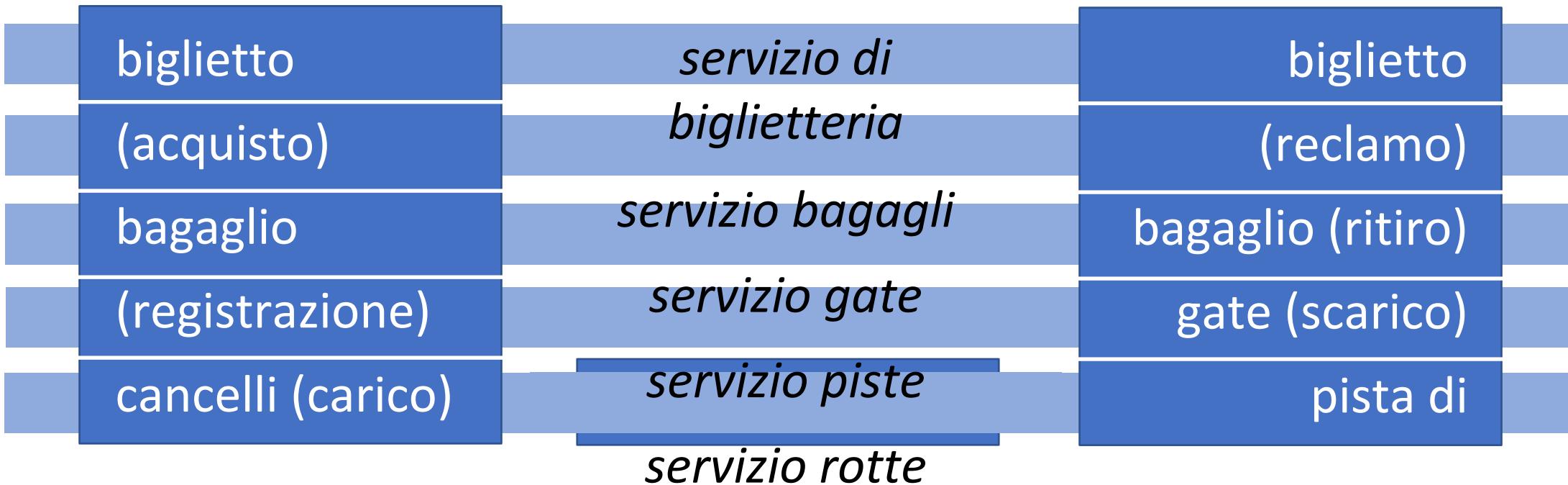
rotta dell'aereo

rotta dell'aereo

Come *definirebbe/discuterebbe* il *sistema* dei viaggi in aereo?

- una serie di passaggi che coinvolgono molti servizi

# Esempio: organizzazione dei viaggi aerei



*strati*: ogni strato implementa un servizio

- attraverso le proprie azioni di livello interno
- affidandosi ai servizi forniti dal livello sottostante

# Perché la stratificazione?

Approccio alla progettazione/discussione di sistemi complessi:

- La struttura esplicita consente l'identificazione, relazione tra i pezzi del sistema
  - *modello di riferimento* stratificato per la discussione
- la modularizzazione facilita la manutenzione e l'aggiornamento del sistema
  - modifica dell'*implementazione del servizio* del livello: trasparente al resto del sistema

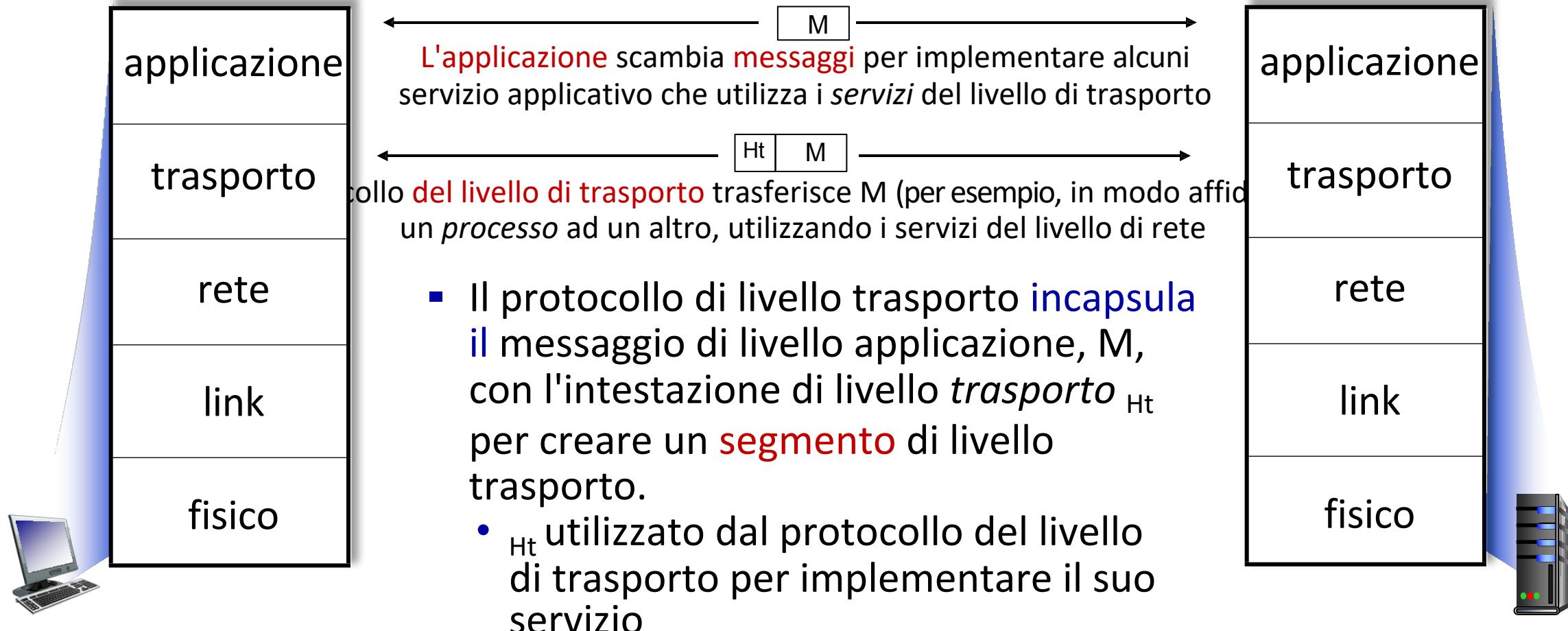
- Ad esempio, la modifica della procedura del cancello non influisce sul resto del sistema.

# Pila di protocolli Internet a livelli

- ***applicazione***: supporto alle applicazioni di rete
  - HTTP, IMAP, SMTP, DNS
- ***trasporto***: trasferimento di dati processo-processo
  - TCP, UDP
- ***rete***: instradamento dei datagrammi dalla sorgente alla destinazione
  - IP, protocolli di routing
- ***link***: trasferimento di dati tra elementi di rete vicini
  - Ethernet, 802.11 (WiFi), PPP
- ***fisico***: bit "sul filo"



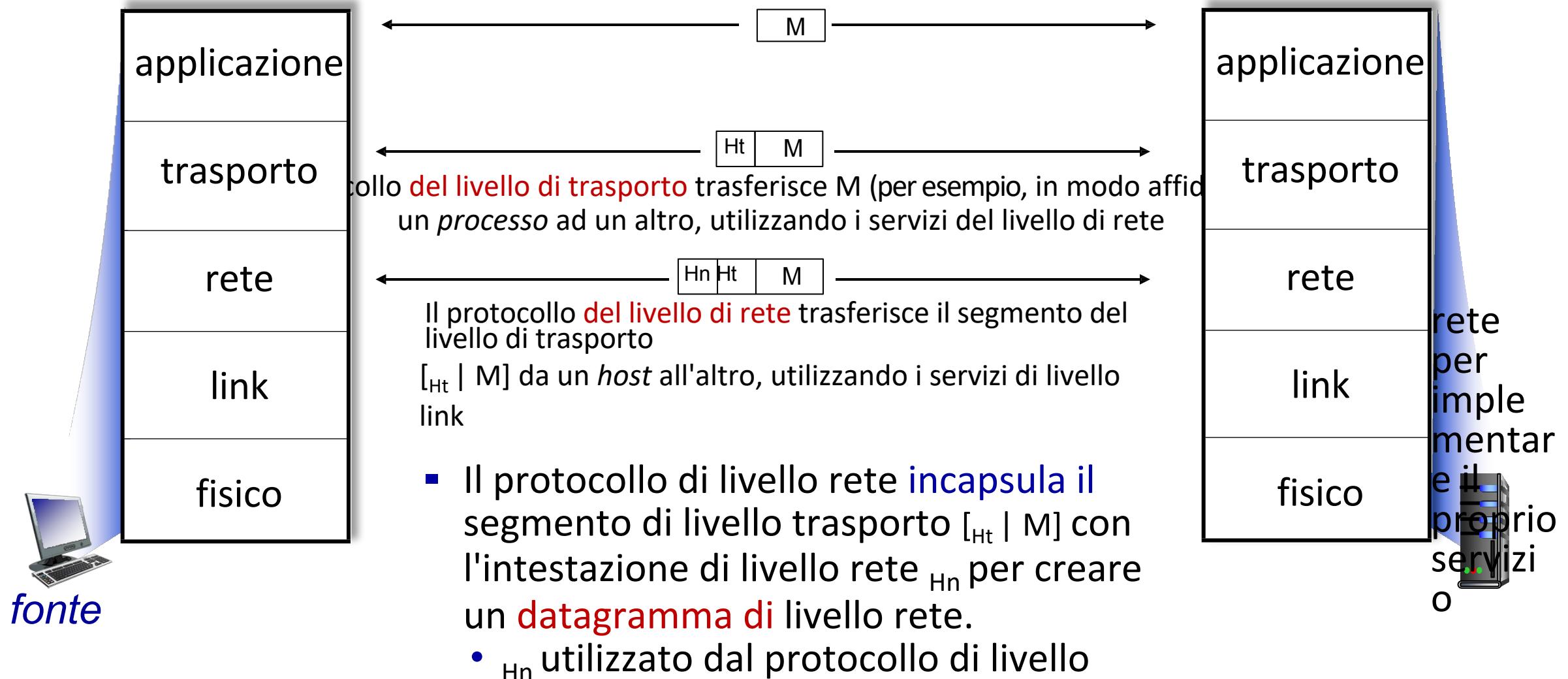
# Servizi, stratificazione e incapsulamento



*sorgente*

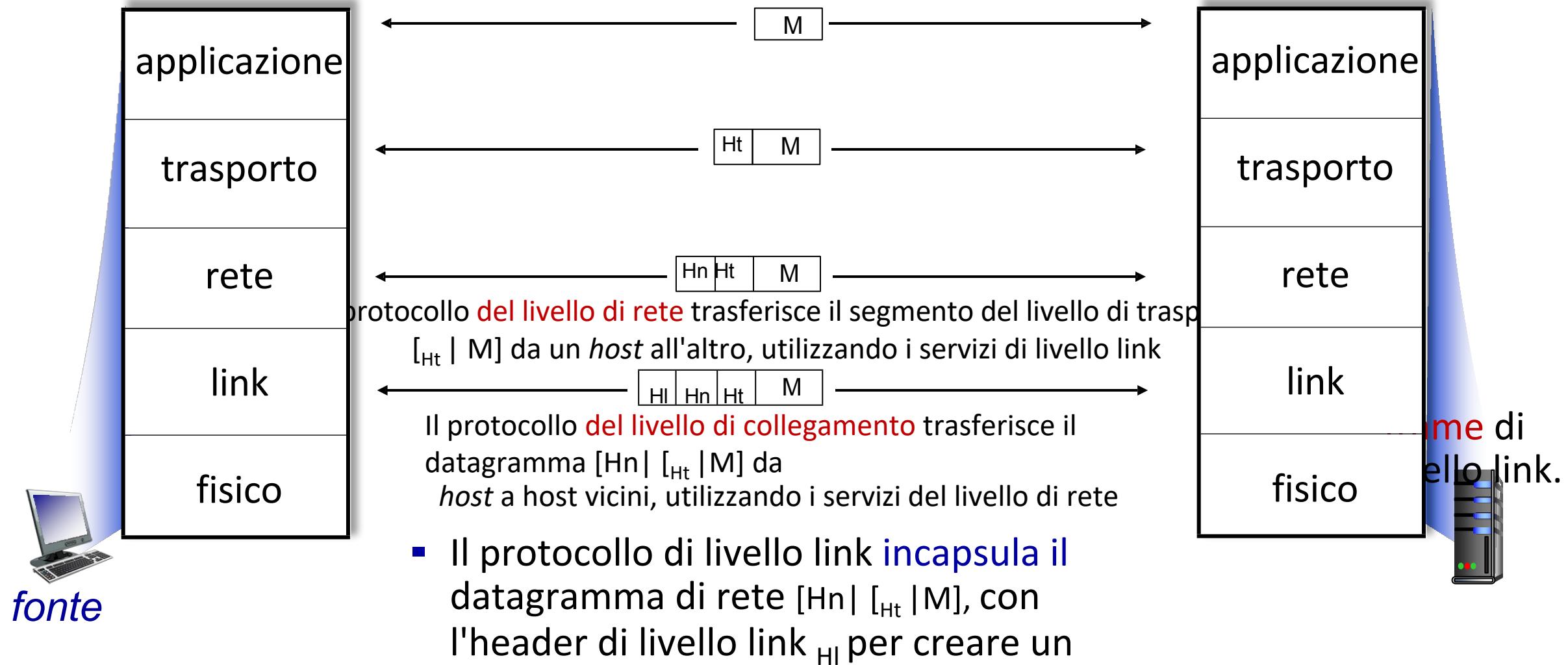
*destinazione*

# Servizi, stratificazione e incapsulamento



*destin  
azione*

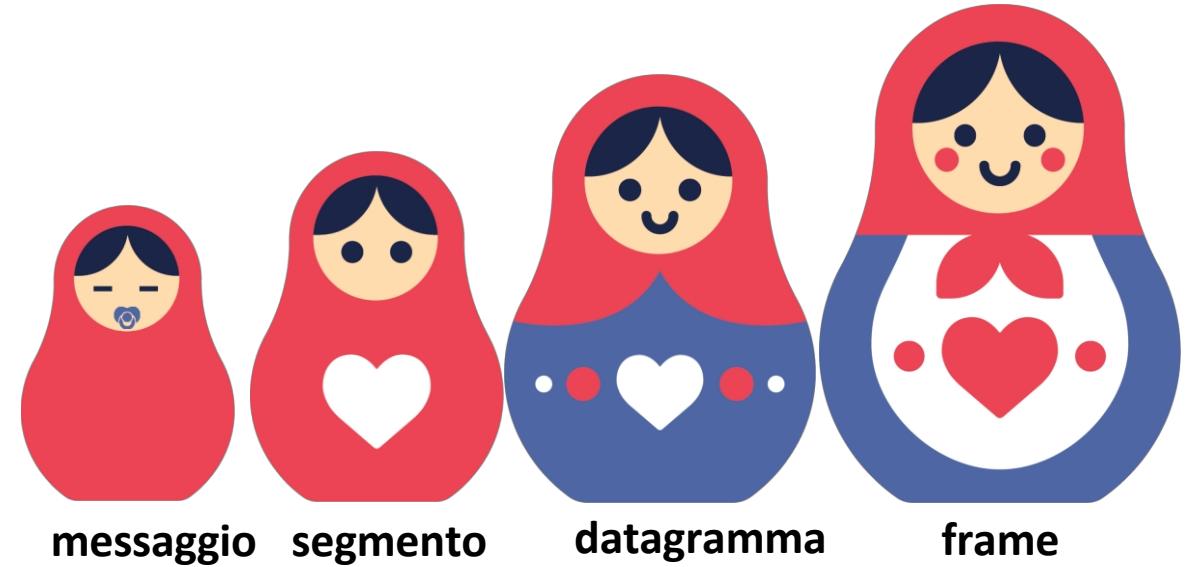
# Servizi, stratificazione e incapsulamento



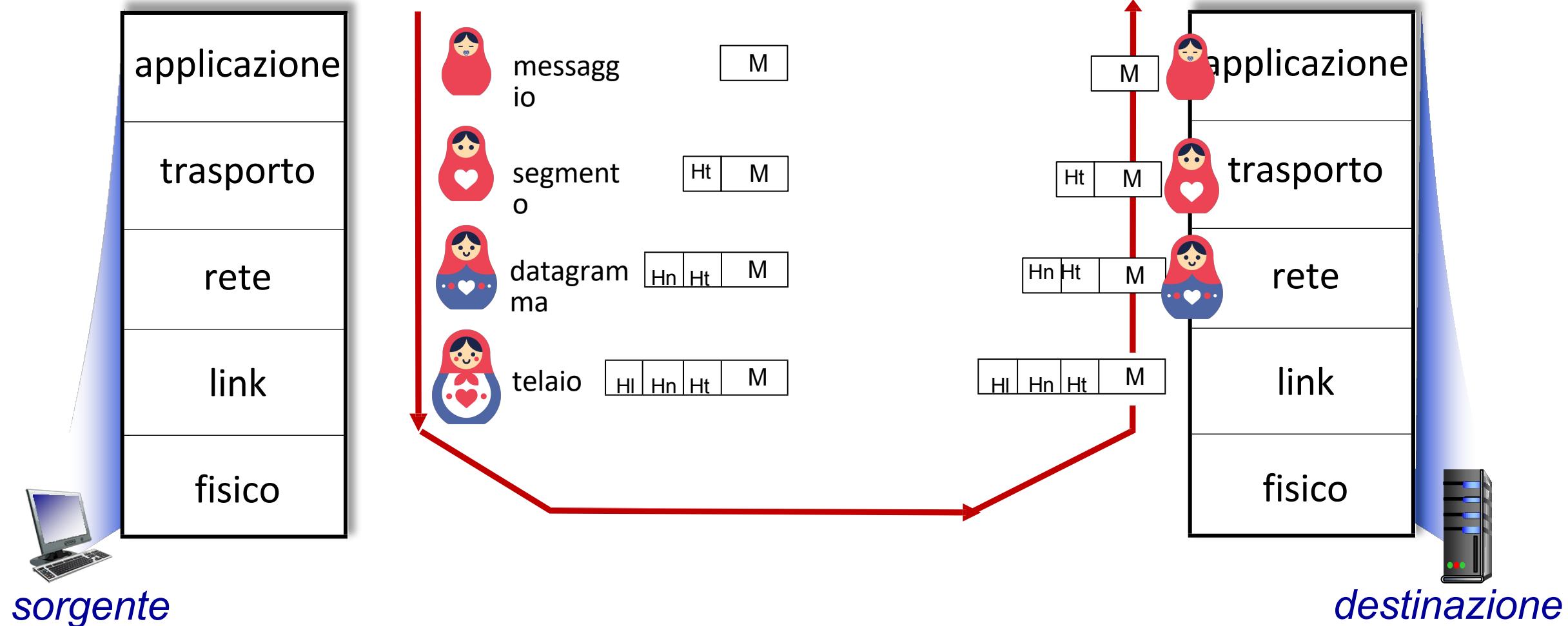
*destin  
azione*

# Incapsulamento

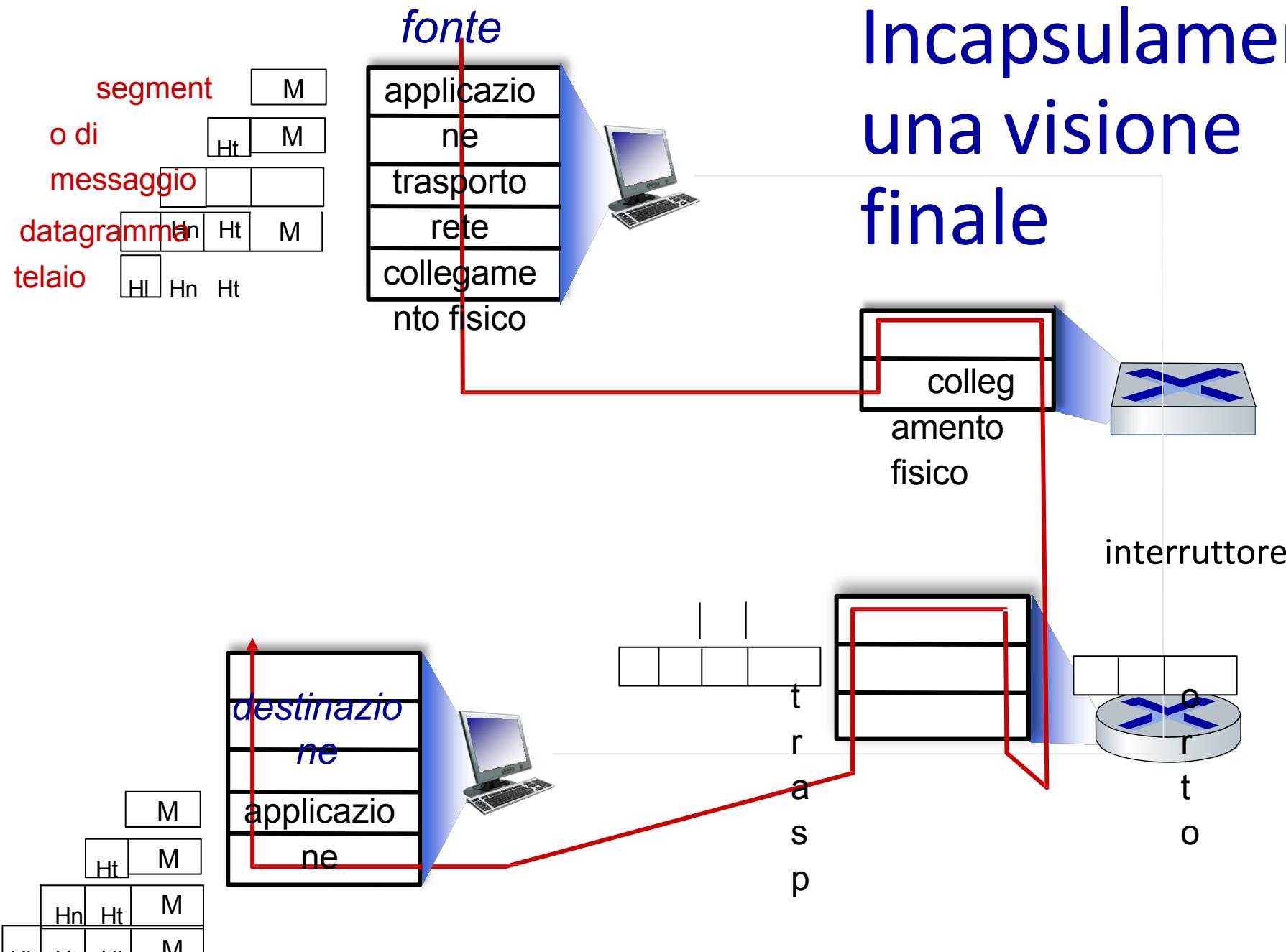
*Bambole matrioska (bambole impilabili)*



# Servizi, stratificazione e incapsulamento



# Incapsulamento: una visione finale



Hl Hn Ht

M

collegamento di rete

fisico

Ht M  
Hn

r  
o  
u  
t  
e  
r

# Introduzione

- Che cos'è Internet?
- Che cos'è un protocollo?
- Bordo della rete: host, rete di accesso, supporti fisici
- Nucleo della rete:  
commutazione di pacchetto/circuito,  
struttura di Internet
- Prestazioni: perdita, ritardo, throughput
- Sicurezza



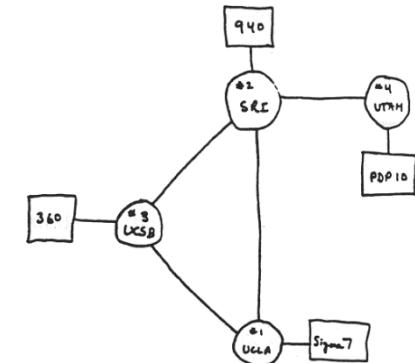
- Livelli di protocollo, modelli di servizio
- La storia

# Storia di Internet

## *1961-1972: Primi principi di commutazione dei pacchetti*

- 1961: Kleinrock - la teoria delle code dimostra l'efficacia del packet-switching ARPAnet operativo
- 1964: Baran - commutazione di pacchetti nelle reti militari
- 1967: ARPAnet è stato concepito dall'Agenzia per i progetti di ricerca avanzata
- 1969: primo nodo

- 1972:
  - Demo pubblica ARPAnet
  - NCP (Network Control Protocol) primo protocollo host-host
  - primo programma di posta elettronica
  - ARPAnet ha 15 nodi



THE ARPA NETWORK

# Storia di Internet

## *1972-1980: Internetworking, reti nuove e proprietarie*

- 1970: Rete satellitare ALOHAnet alle Hawaii
- 1974: Cerf e Kahn - architettura per reti interconnesse
- 1976: Ethernet allo Xerox PARC
- Fine anni '70: architetture proprietarie: DECnet, SNA, XNA
- 1979: ARPAnet ha 200 nodi

I principi di internetworking di Cerf e Kahn:

- minimalismo, autonomia - non sono necessarie modifiche interne per l'interconnessione delle reti
- modello di servizio best-effort
- instradamento stateless
- controllo decentralizzato

definire l'attuale architettura di Internet

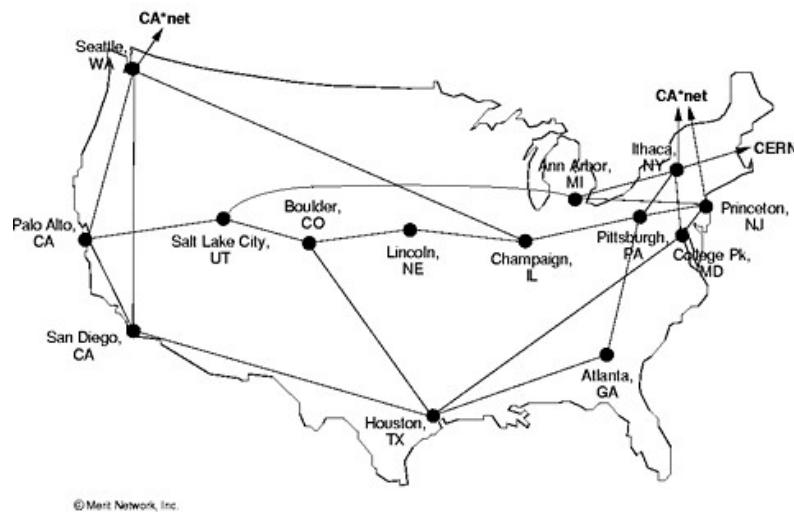
# Storia di Internet

## *1980-1990: nuovi protocolli, proliferazione delle reti*

- 1983: diffusione di TCP/IP    congestione TCP
- 1982: definito il protocollo  
e-mail smtp
- 1983: Definito il DNS per la  
traduzione da nome a  
indirizzo IP
- 1985: definito il protocollo  
ftp
- 1988: Controllo della

- nuove reti nazionali:  
CSnet, BITnet,  
NSFnet, Minitel
- 100.000 host  
collegati a una  
confederazione di  
reti

NSFNET T1 Network 1991



© Merv Network, Inc.

# Storia di Internet

## *1990, anni 2000: commercializzazione, Web, nuove applicazioni*

- primi anni '90:
  - ARPAnet viene dismesso
- 1991: NSF elimina le restrizioni sull'uso commerciale di NSFnet (disattivato nel 1995).
- primi anni '90: Web
  - ipertesto [Bush 1945, Nelson 1960].
  - HTML, HTTP: Berners-Lee
- 1994: Mosaic, poi Netscape
- Fine anni '90: commercializzazione del Web

## fine anni '90 - anni 2000:

- altre applicazioni  
killer: messaggistica  
istantanea,  
condivisione di file  
P2P
- sicurezza di rete in primo piano
- est. 50 milioni di host,  
oltre 100 milioni di utenti
- collegamenti backbone che  
funzionano a Gbps

# Storia di Internet

## *2005-oggi: scala, SDN, mobilità, cloud*

- diffusione aggressiva dell'accesso domestico a banda larga (10-100 Mbps)
- 2008: rete definita dal software (SDN)
- la crescente ubiquità dell'accesso wireless ad alta velocità: 4G/5G, WiFi
- i fornitori di servizi (Google, FB, Microsoft) creano le proprie reti
  - bypassare l'Internet commerciale per connettersi "vicino" all'utente finale, fornendo accesso "istantaneo" a social media, ricerca, contenuti video, ...
- le imprese gestiscono i loro servizi in "cloud" (ad esempio, Amazon Web Services, Microsoft Azure)
- aumento degli smartphone: più dispositivi mobili che fissi su Internet (2017)
- ~15B dispositivi collegati a Internet (2023, statista.com)