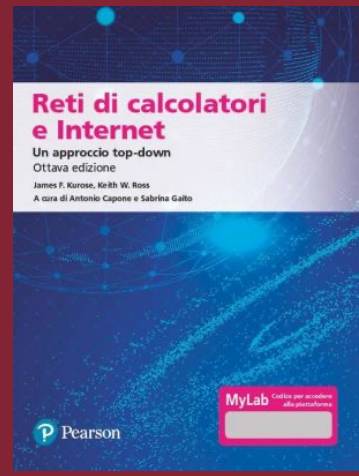
Reti di Elaboratori

Livello di Trasporto: controllo della congestione



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Alessandro Checco
alessandro.checco@uniroma1.it

Capitolo 3

Chiusura di una connessione TCP

- client, server chiudono ciascuno il proprio lato di connessione
  - invia il segmento TCP con il bit FIN = 1
- rispondere al FIN ricevuto con ACK
  - alla ricezione del FIN, l'ACK può essere combinato con il proprio FIN
- possono essere gestiti scambi FIN simultanei

Livello di trasporto: sommario

- Servizi a livello di trasporto
- Multiplexing e demultiplexing
- Trasporto senza connessione: UDP
- Principi di trasferimento affidabile dei dati
- Trasporto orientato alla connessione: TCP
  - struttura del segmento
  - trasferimento affidabile dei dati
  - controllo del flusso
  - gestione della connessione
- Principi di controllo della congestione
- Controllo della congestione TCP
- Evoluzione della funzionalità del livello di trasporto

Principi di controllo della congestione

Congestione:

- informalmente: "troppe fonti che inviano troppi dati troppo velocemente per essere gestiti dalla *rete*"
- manifestazioni:
  - lunghi ritardi (accodamento nei buffer del router)
  - pacchetti (buffer overflow sui router)
- diverso dal controllo di flusso!
- un problema nei top 10!

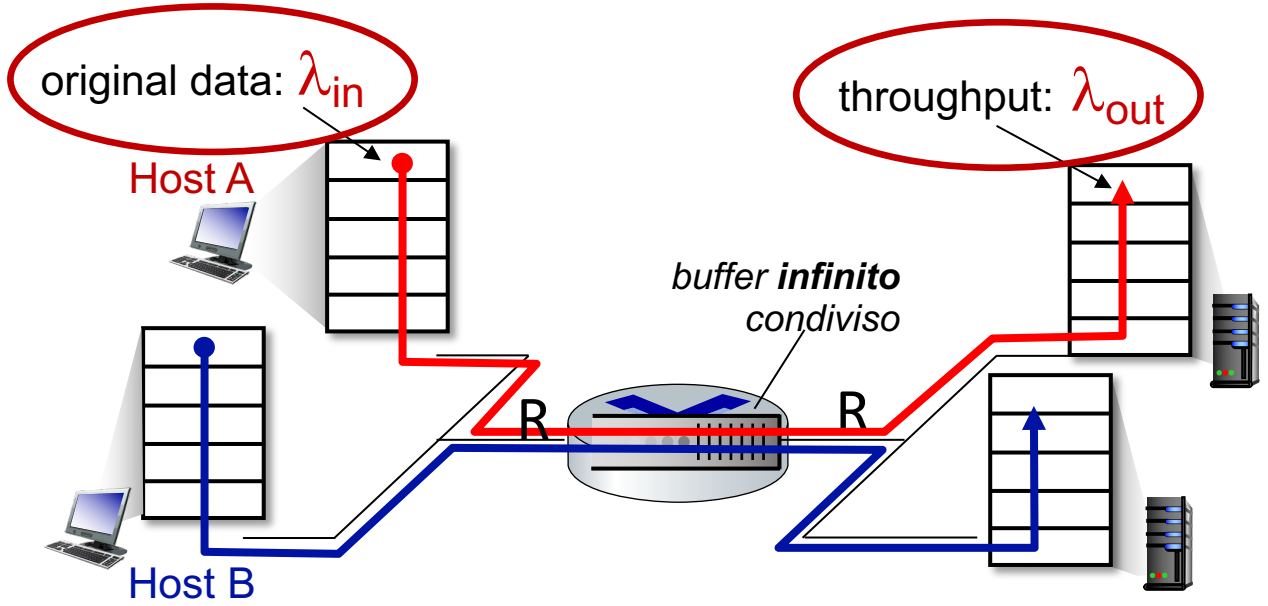
controllo della congestione: troppi mittenti, invio troppo veloce

controllo del flusso: un mittente troppo veloce per un destinatario

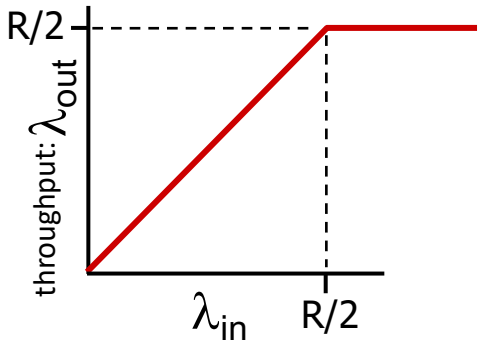
Cause/costi della congestione: scenario 1

Scenario più semplice:

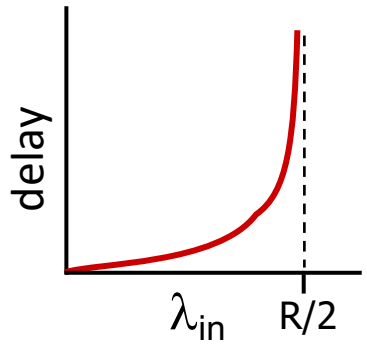
- un router, buffer infiniti
- rate dei link R
- due flussi
- non sono necessarie ritrasmissioni



D: Cosa succede quando il tasso di arrivo è λ_{in} si avvicina a R/2?



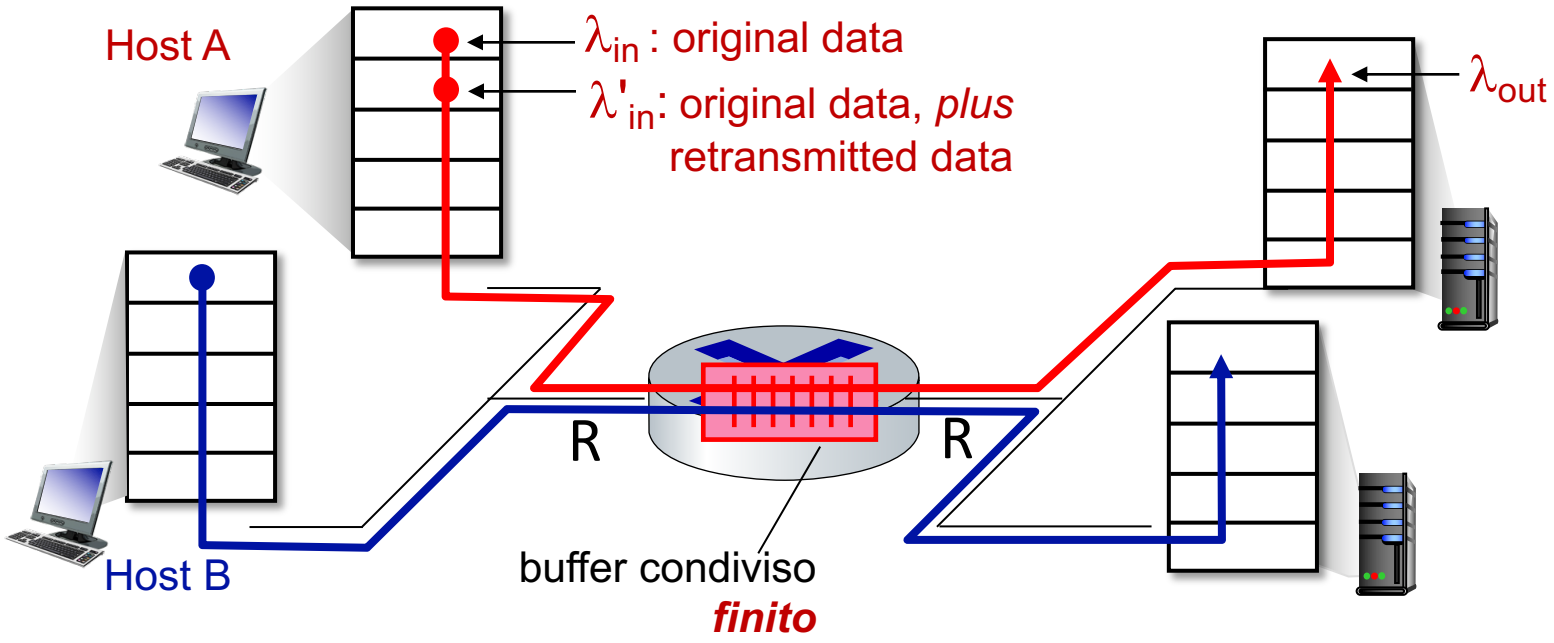
throughput massimo per connessione: R/2



ritardi alti quando λ_{in} si avvicina a R/2

Cause/costi della congestione: scenario 2

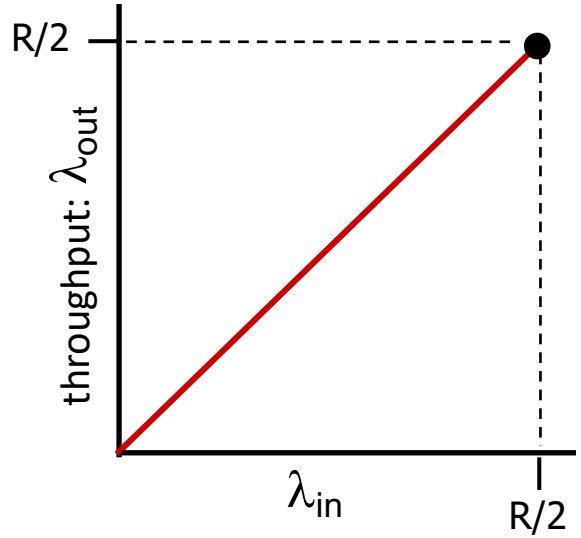
- un router, buffer *finiti*
- mittente ritrasmette pacchetti persi (timeout)
  - application-layer input = application-layer output: $\lambda_{in} = \lambda_{out}$
  - transport-layer input include *ritrasmissioni:* $\lambda'_{in} \geq \lambda_{in}$

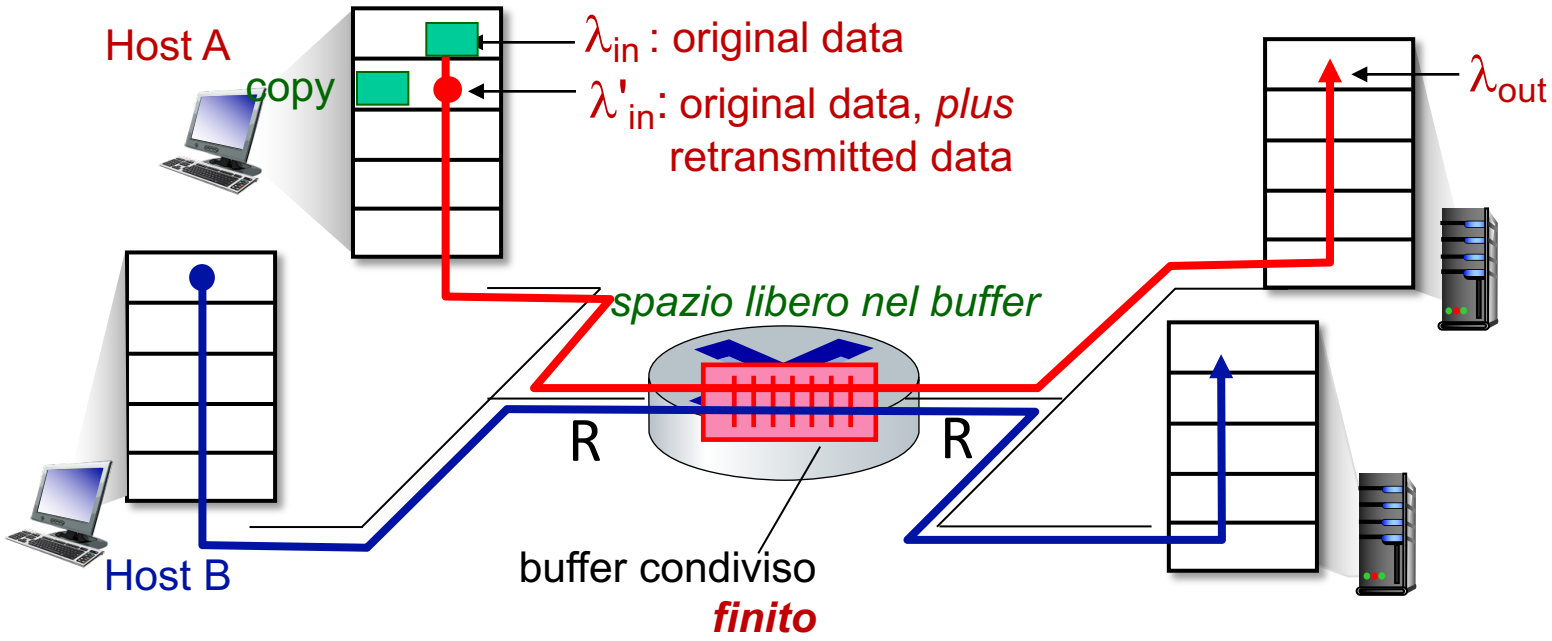


Cause/costi della congestione: scenario 2

Assunzione idealizzata: perfect knowledge

- il mittente invia solo se sa che i buffer nei router sono liberi
- tutto a posto, ma ritardi comunque crescono senza limite all'approcciare di R/2

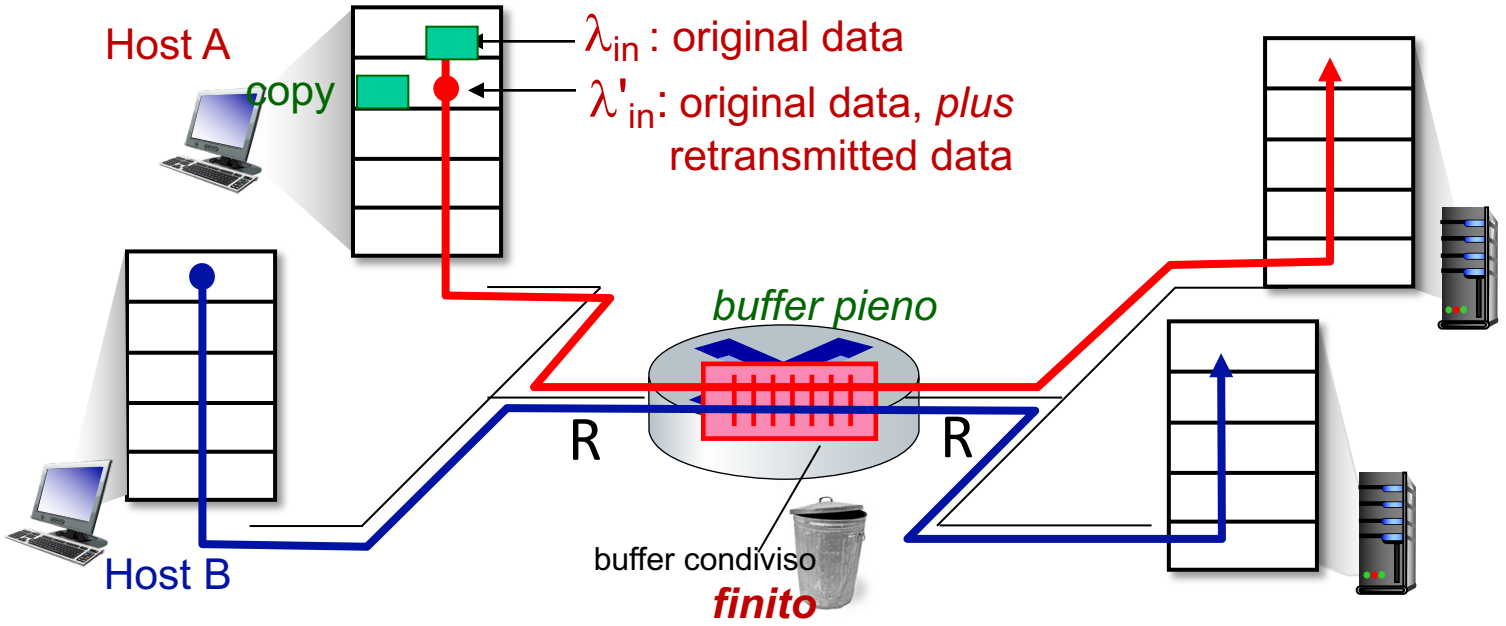




Cause/costi della congestione: scenario 2

Assunzione: *parte* di perfect knowledge

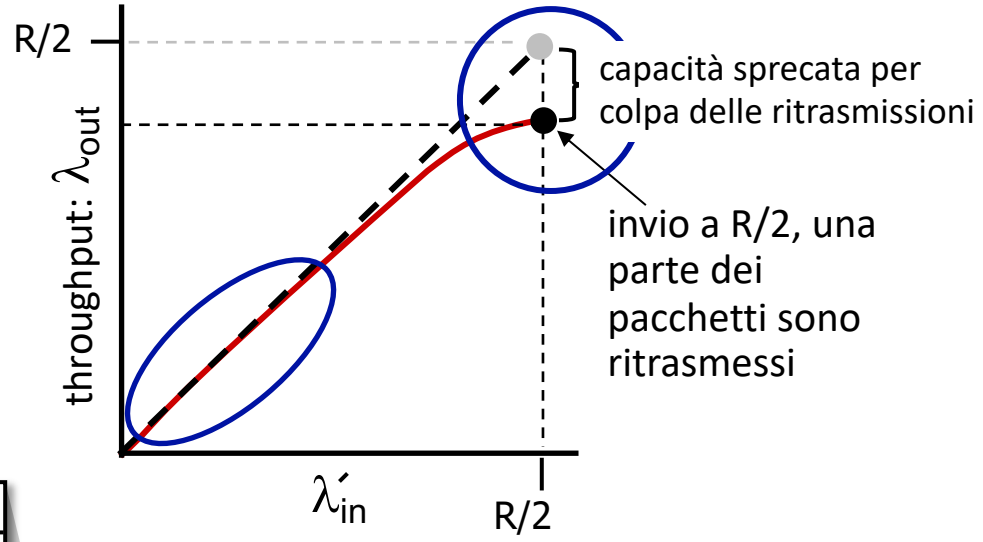
- i pacchetti possono essere scartati per buffer del router pieno
- il mittente ha conoscenza perfetta di quali pacchetti sono persi: ritrasmette solo i pacchetti che sa essere persi

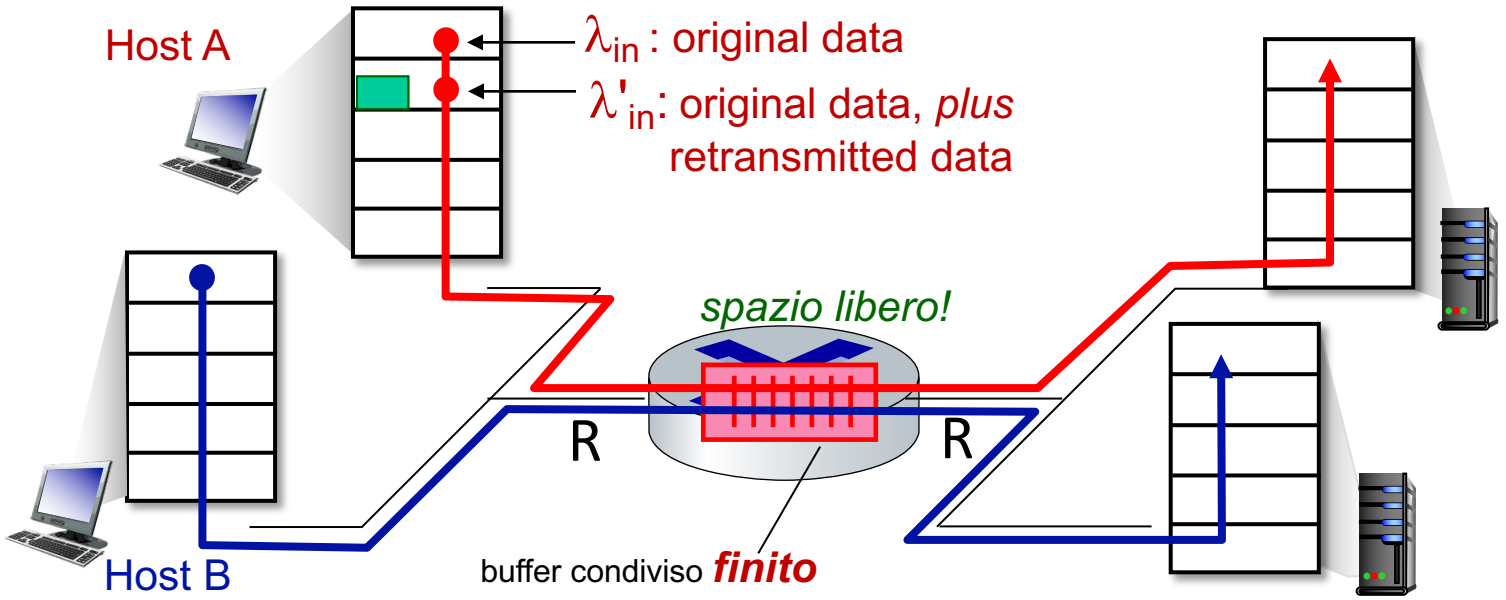


Cause/costi della congestione: scenario 2

Assunzione: *parte* di perfect knowledge

- i pacchetti possono essere scartati per buffer del router pieno
- il mittente ha conoscenza perfetta di quali pacchetti sono persi: ritrasmette solo i pacchetti che sa essere persi

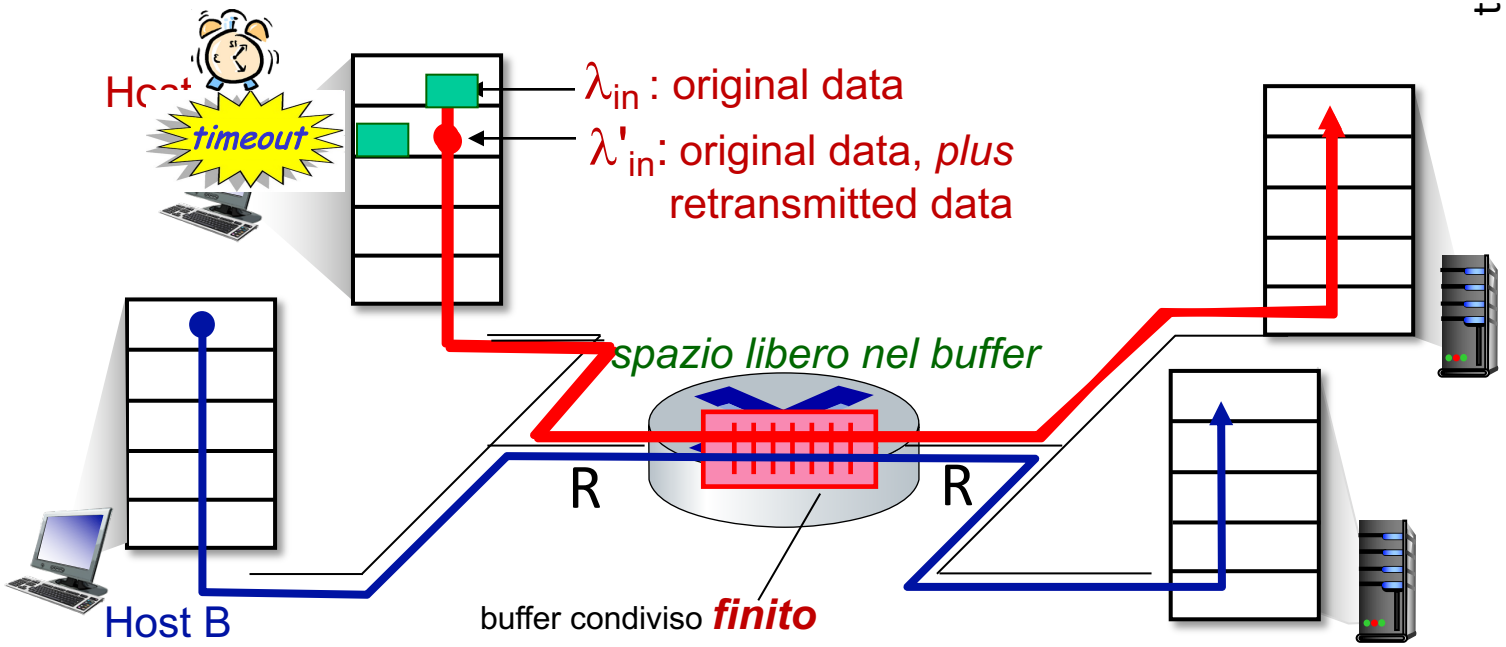


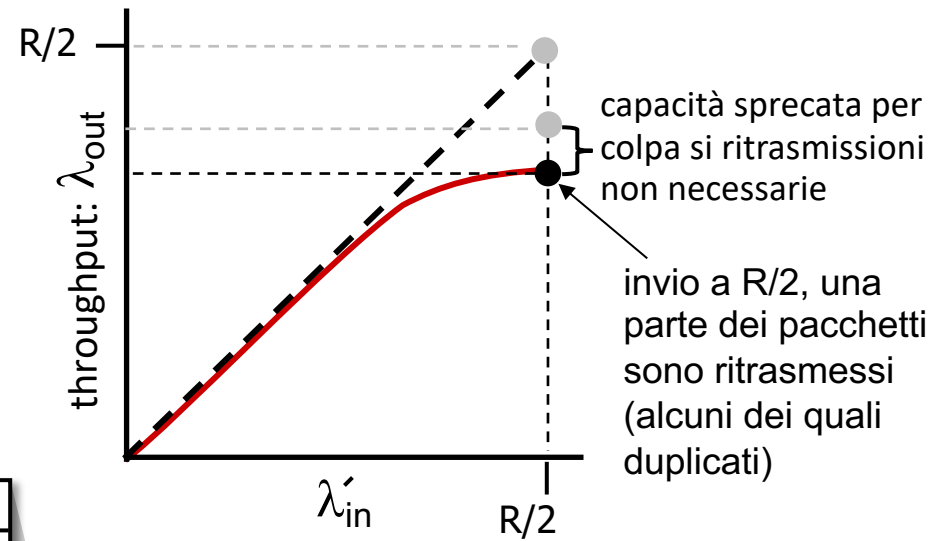


Cause/costi della congestione: scenario 2

Scenario realistico: *duplicati non necessari*

- i pacchetti possono essere persi, scartati dal router a causa di buffer pieni, richiedendo ritrasmissioni
- ma i tempi del mittente possono scadere prematuramente, inviandone *due* copie, *entrambe* consegnate

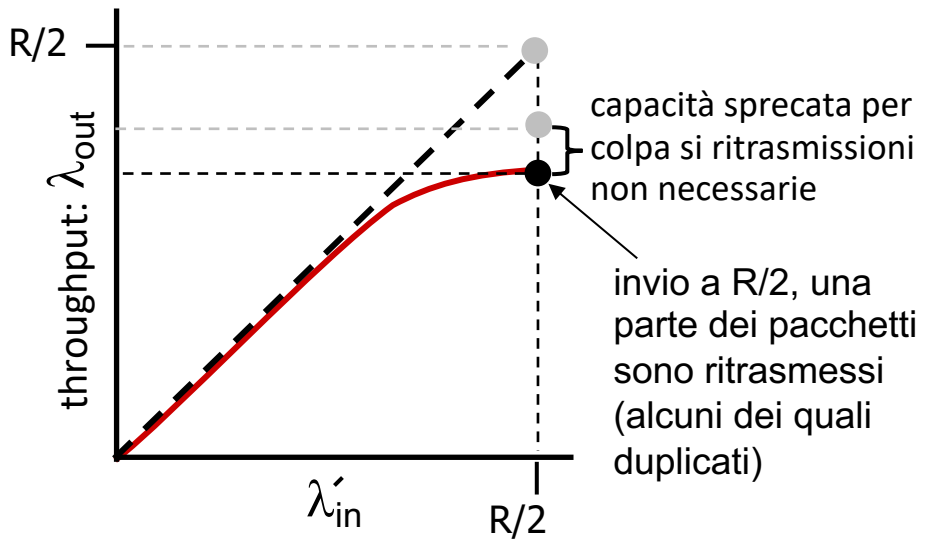




Cause/costi della congestione: scenario 2

Scenario realistico: *duplicati non necessari*

- i pacchetti possono essere persi, scartati dal router a causa di buffer pieni, richiedendo ritrasmissioni
- ma i tempi del mittente possono scadere prematuramente, inviandone *due* copie, *entrambe* consegnate



"costi" della congestione:

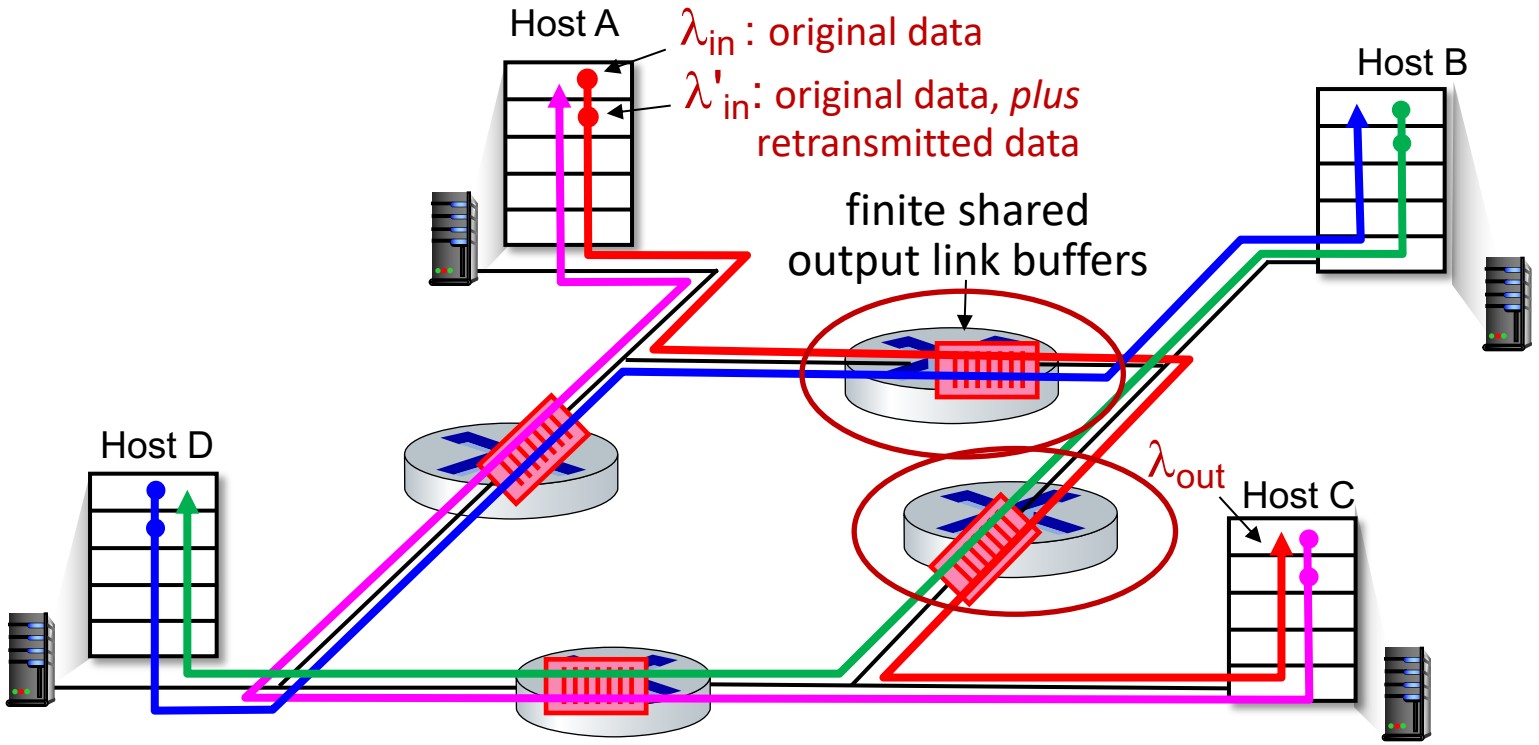
- serve più lavoro (ritrasmissioni) per un dato throughput durante congestione
- ritrasmissioni non necessarie: il collegamento trasporta più copie di un pacchetto
  - diminuzione del throughput massimo ottenibile

Cause/costi della congestione: scenario 3

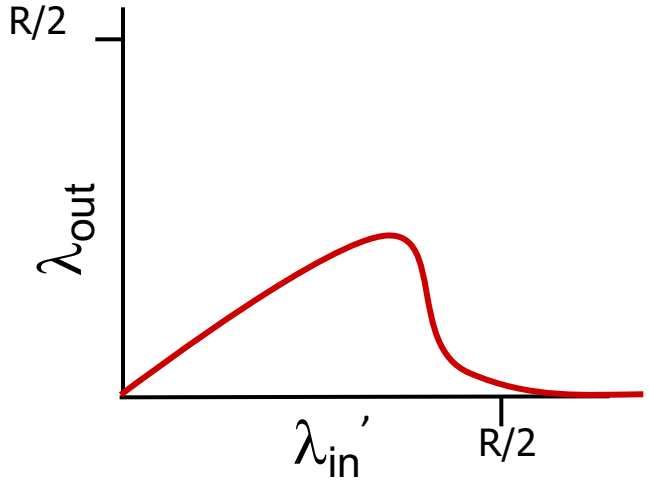
- *quattro* mittenti
- percorsi *multi-hop*
- timeout/ritrasmissione

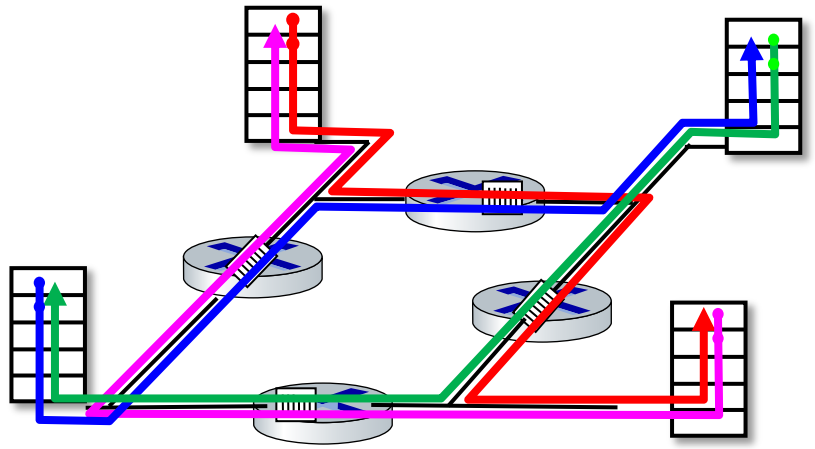
Q: cosa succede quando λ_{in} e λ_{in}' crescono?

A: quando λ_{in}' cresce, i pacchetti hanno bassa probabilità di non essere scartati a ogni hop → 0



Cause/costi della congestione: scenario 3



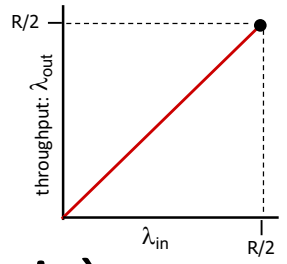


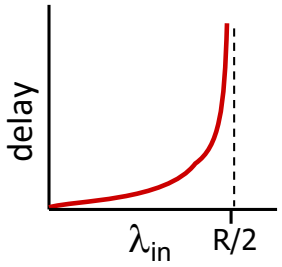
un altro “costo” della congestione:

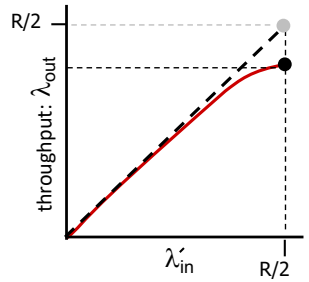
- quando il pacchetto è scartato, tutta la capacità di trasmissione upstream e il buffering utilizzati per quel pacchetto sono stati sprecati!

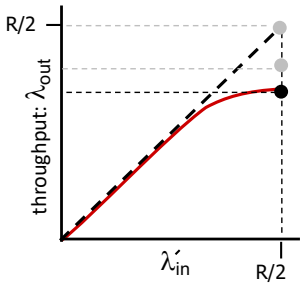
Cause/costi della congestione: approfondimenti

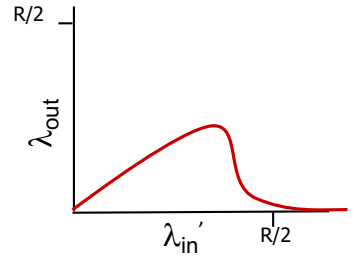
- il throughput non può mai superare la capacità
- il ritardo aumenta con l'avvicinarsi alla capacità
- la perdita/ritrasmissione riduce il throughput effettivo
- i duplicati non necessari riducono ulteriormente il throughput effettivo
- capacità di trasmissione/buffering upstream sprecata per i pacchetti persi downstream (reti multi-hop)







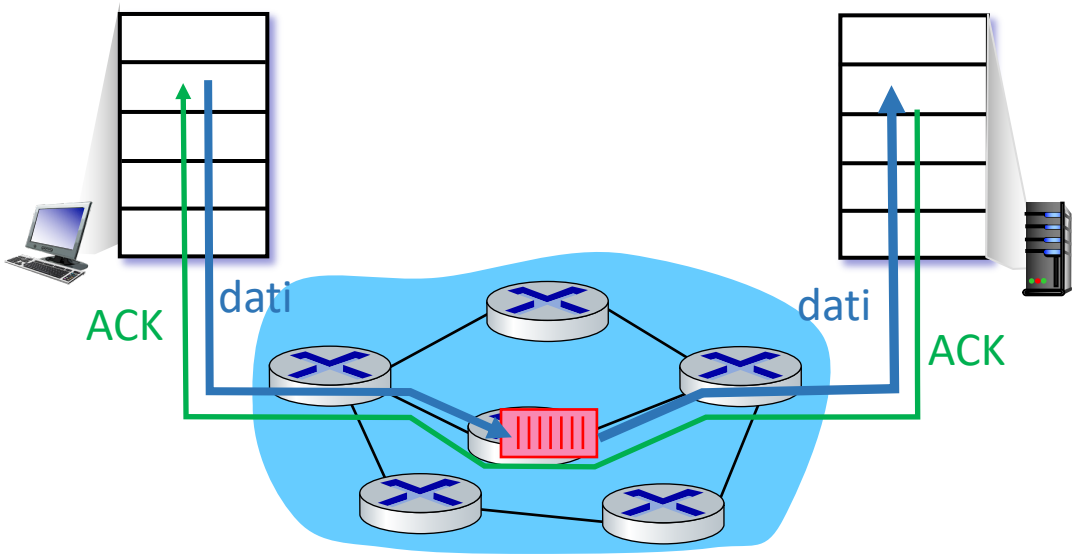




Approcci al controllo della congestione

controllo della congestione end-to-end (punto punto):

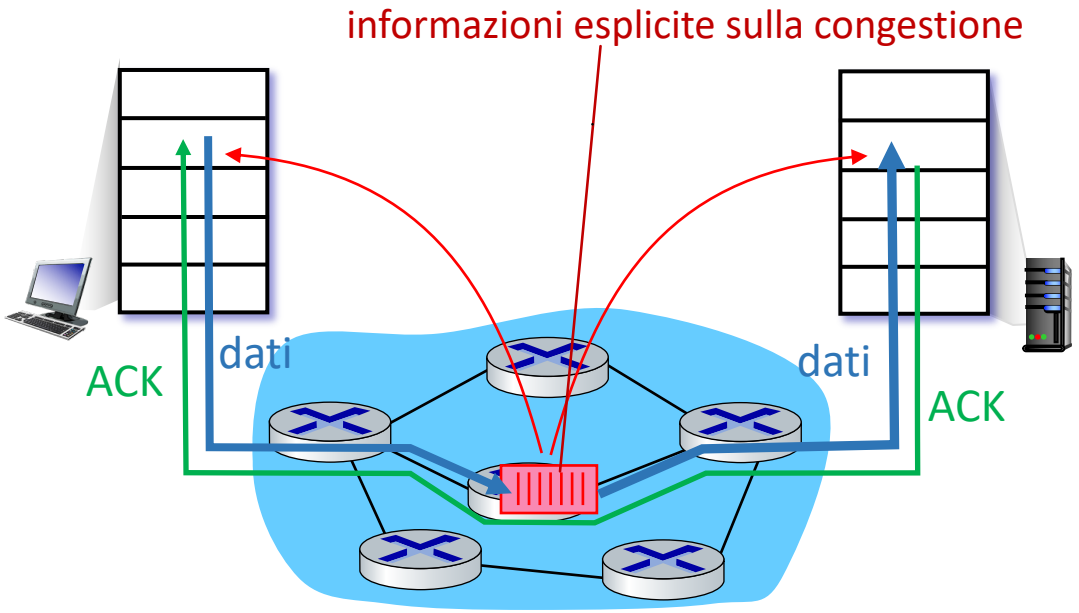
- nessun feedback esplicito dalla rete
- congestione *dedotta* dalle perdite (e ritardi) osservati
- approccio adottato dal TCP



Approcci al controllo della congestione

Controllo della congestione assistito dalla rete:

- i router forniscono un feedback *diretto* agli host di invio/ricezione con flussi che passano attraverso router congestionati
- può indicare il livello di congestione o la velocità di invio impostata in modo esplicito
- Protocolli TCP ECN, ATM, DECbit



Livello di trasporto: sommario

- Servizi a livello di trasporto
- Multiplexing e demultiplexing
- Trasporto senza connessione: UDP
- Principi di trasferimento affidabile dei dati
- Trasporto orientato alla connessione: TCP
  - struttura del segmento
  - trasferimento affidabile dei dati
  - controllo del flusso
  - gestione della connessione
- Principi di controllo della congestione
- Controllo della congestione TCP
- Evoluzione della funzionalità del livello di trasporto

Controllo della congestione TCP: AIMD

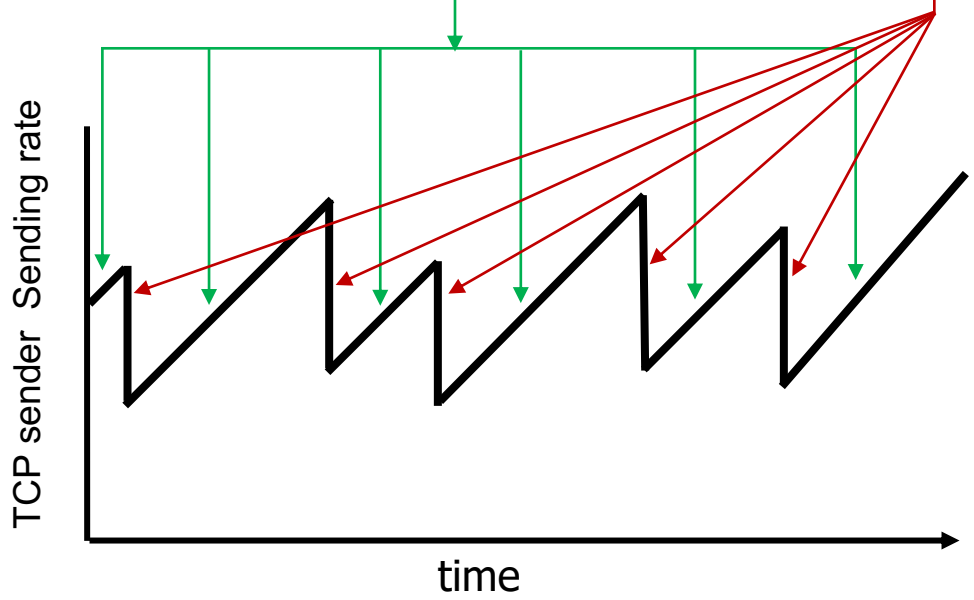
- *approccio:* i mittenti possono aumentare la velocità di invio fino a quando si verifica la perdita di pacchetti (congestione), quindi diminuire la velocità di invio in caso di pacchetti persi

Additive Increase

aumenta il rate di 1 MSS ogni RTT fino a quando una perdita viene osservata

Multiplicative Decrease

a ogni evento di perdita dividi per due il rate di invio



AIMD: comportamento a dente di sega: *sondando* la larghezza di banda

TCP AIMD

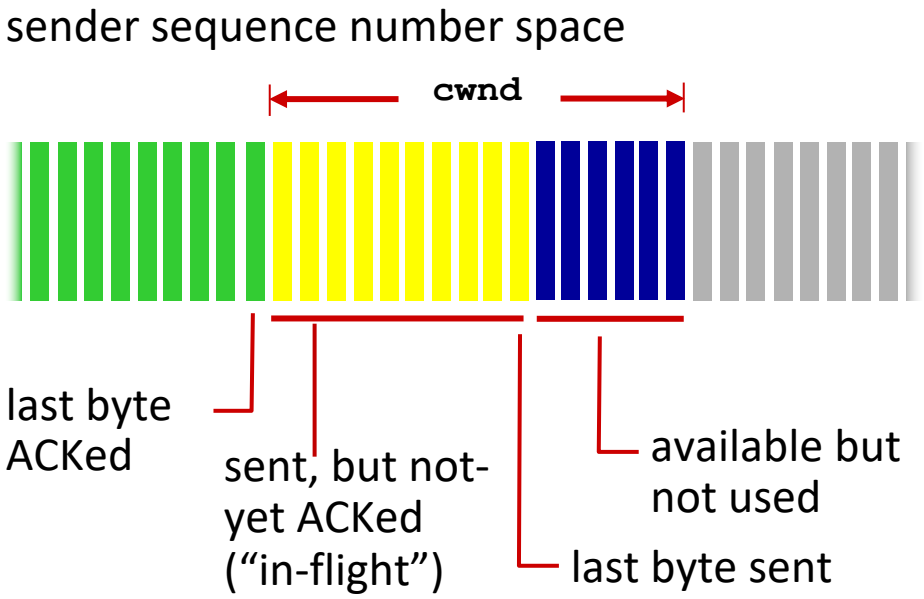
Multiplicative decrease: il rate di invio (prop. a numero di MSS in volo) è

- Dimezzato in caso di perdita rilevata dal triplo ACK duplicato (TCP Reno fast recovery)
- Diminuita a 1 MSS (dimensione massima del segmento) quando la perdita viene rilevata dal timeout (TCP Tahoe slow start)

Perché AIMD?

- AIMD, un algoritmo asincrono distribuito, ha dimostrato di:
  - ottimizzare le portate congestionate su tutta la rete!
  - hanno proprietà di stabilità desiderabili

Controllo della congestione TCP: dettagli



Comportamento di invio TCP:

- *approssimativamente:* invia `cwnd` byte, attendi RTT per ACKS, quindi invia più byte

$$\text{TCP rate} \approx \frac{\texttt{cwnd}}{\text{RTT}} \text{ bytes/sec}$$

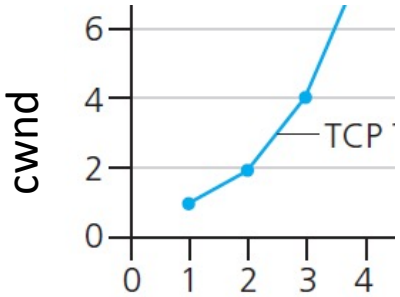
- Mittente limita la trasmissione: **`LastByteSent-LastByteAcked ≤ cwnd`**
- `cwnd` è cambiato dinamicamente reagendo alla congestione osservata

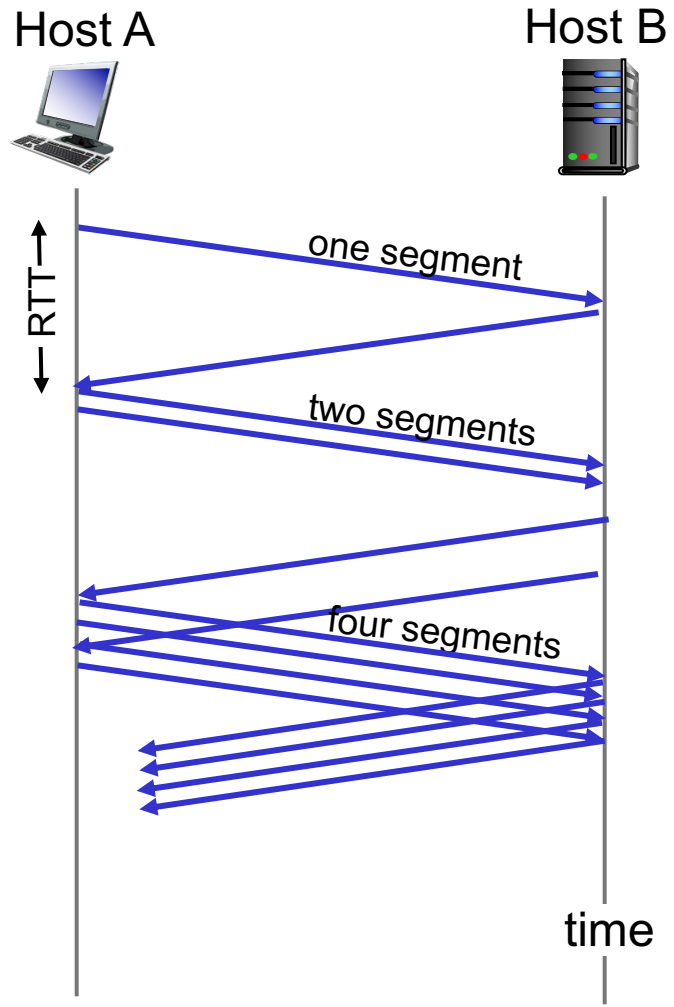
Additive increase: aumenta il rate di 1 MSS ogni RTT significa approx cwnd = cwnd + (1/cwnd) a ogni ACK, quindi dopo una intera cwnd ottendo cwnd = cwnd + 1

TCP slow start

- quando inizia la connessione, aumenta la velocità in modo esponenziale (+1 MSS per ogni ACK) fino alla prima perdita:
  - inizialmente **`cwnd`** = 1 MSS
  - raddoppia **`cwnd`** ogni RTT

- *slow?* Il rate iniziale è basso, ma aumenta esponenzialmente





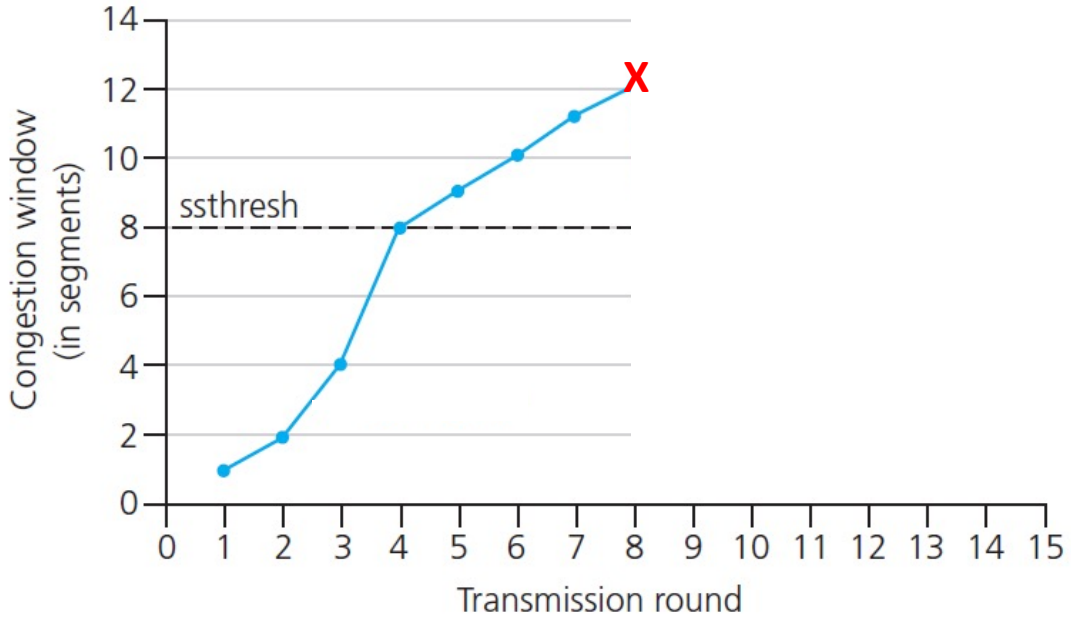
TCP: transizione slow start/congestion avoidance

D: quando passare da crescita esponenziale a lineare?

A: quando **`cwnd`** arriva a 1/2 del suo valore prima dell'ultima perdita di pacchetto

Implementazione:

- variabile **`ssthresh`**
- in caso di perdita, **`ssthresh`** è impostato su 1/2 di **`cwnd`** appena prima dell'evento di perdita



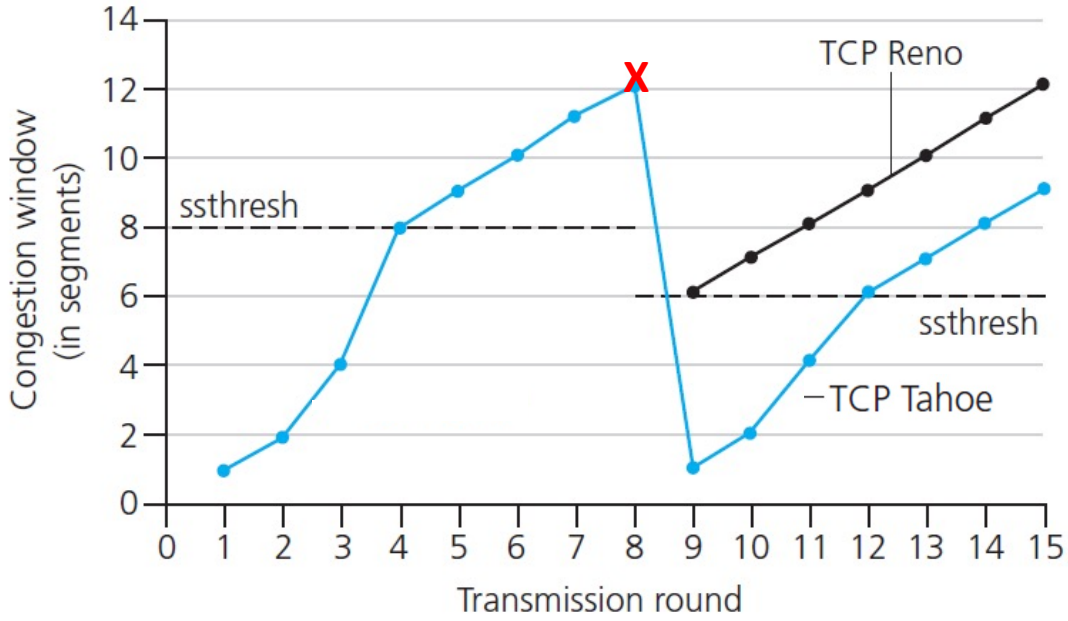
TCP: transizione slow start/congestion avoidance

D: quando passare da crescita esponenziale a lineare?

A: quando **`cwnd`** arriva a 1/2 del suo valore prima dell'ultima perdita di pacchetto

Implementazione:

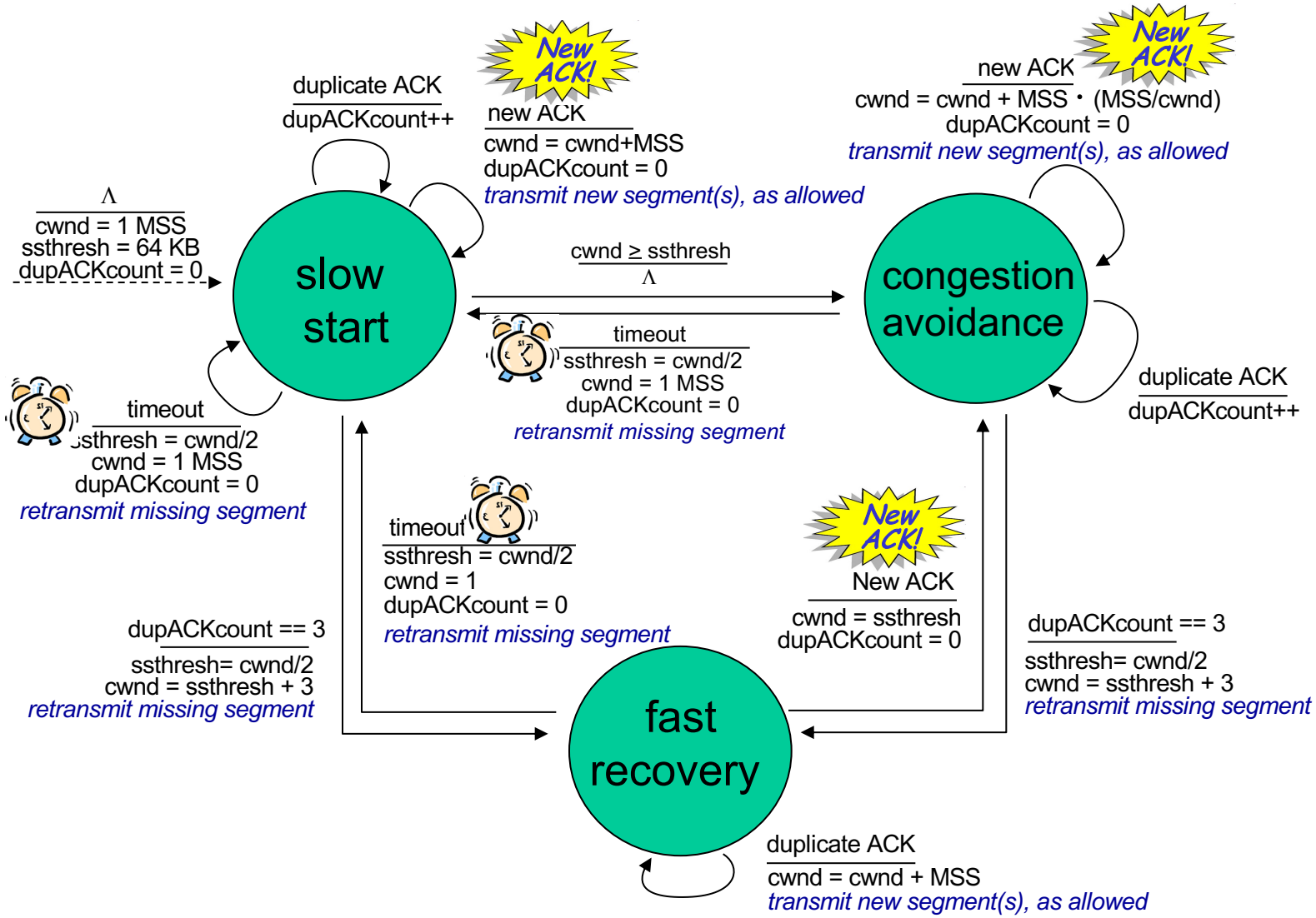
- variabile **`ssthresh`**
- in caso di perdita, **`ssthresh`** è impostato su 1/2 di **`cwnd`** appena prima dell'evento di perdita
- TCP Reno passa direttamente alla fase di congestion avoidance quando la perdita è causata da 3 dup ACK (dopo una breve fase di *fast recovery non mostrata nel grafico*)



Sommario: controllo della congestione TCP: Reno

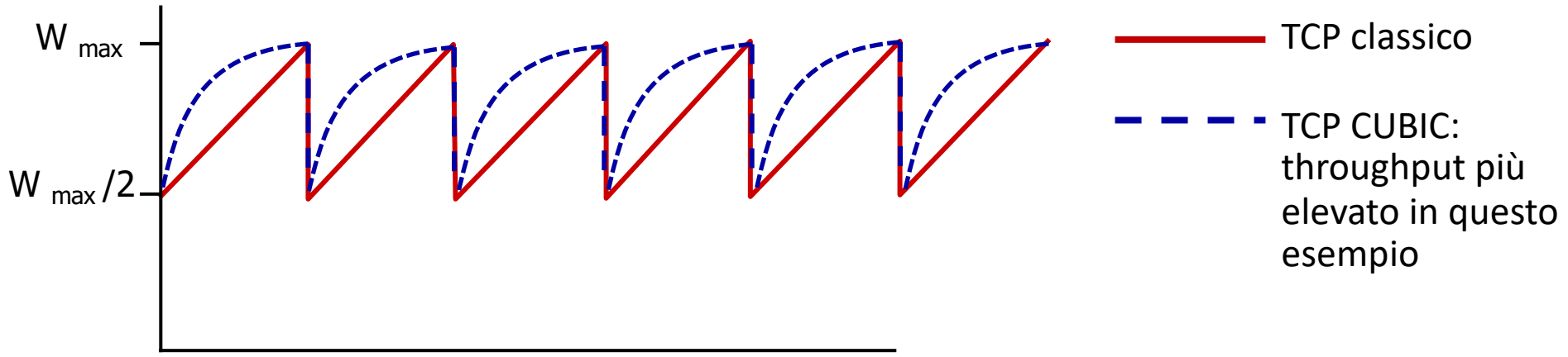
Slow start + (AIMD) + (Fast Retrasmit) + **Congestion Avoidance** = TCP Tahoe

Tahoe + Fast Recovery = TCP Reno



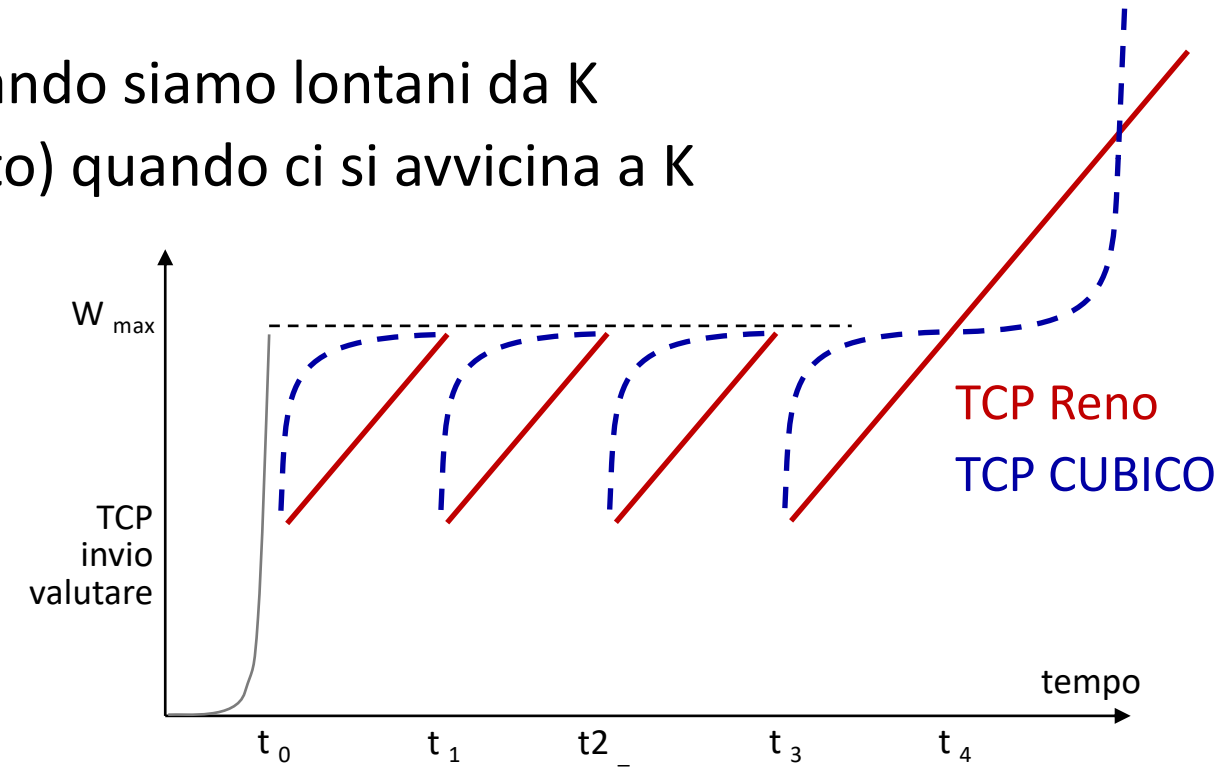
TCP CUBIC

- Esiste un modo migliore di AIMD per "sondare" la larghezza di banda utilizzabile?
- Intuizione:
  - W_{max} : velocità di invio quando è stata rilevata la perdita di congestione
  - lo stato di congestione del probabilmente (?) nel frattempo non è cambiato molto
  - dopo aver dimezzato la frequenza/finestra in caso di perdita, vogliamo salire fino a W_{max} *velocemente*, ma poi avvicinarci a W_{max} *lentamente* (rispetto a TCP classico)



TCP CUBIC

- K: momento stimato in cui la dimensione della finestra TCP raggiungerà W_{max}
  - La stima è definita in RFC 8312
- aumentare W in funzione del *cubo* della distanza tra il tempo corrente e K
  - aumenta velocemente quando siamo lontani da K
  - aumenta lentamente (cauto) quando ci si avvicina a K
- TCP CUBIC predefinito in Linux, il TCP più popolare per i server Web più diffusi

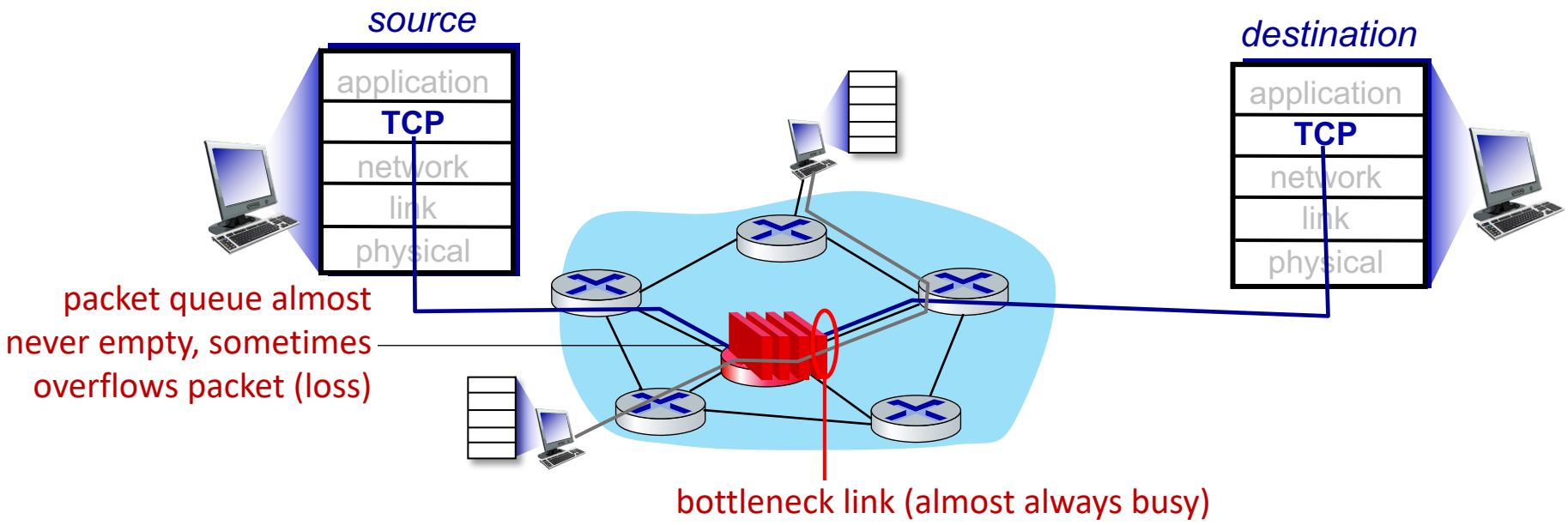


Livello di trasporto: sommario

- Servizi a livello di trasporto
- Multiplexing e demultiplexing
- Trasporto senza connessione: UDP
- Principi di trasferimento affidabile dei dati
- Trasporto orientato alla connessione: TCP
  - struttura del segmento
  - trasferimento affidabile dei dati
  - controllo del flusso
  - gestione della connessione
- Principi di controllo della congestione
- Controllo della congestione TCP
  - Approcci delay-based e network-assisted
- Evoluzione della funzionalità del livello di trasporto

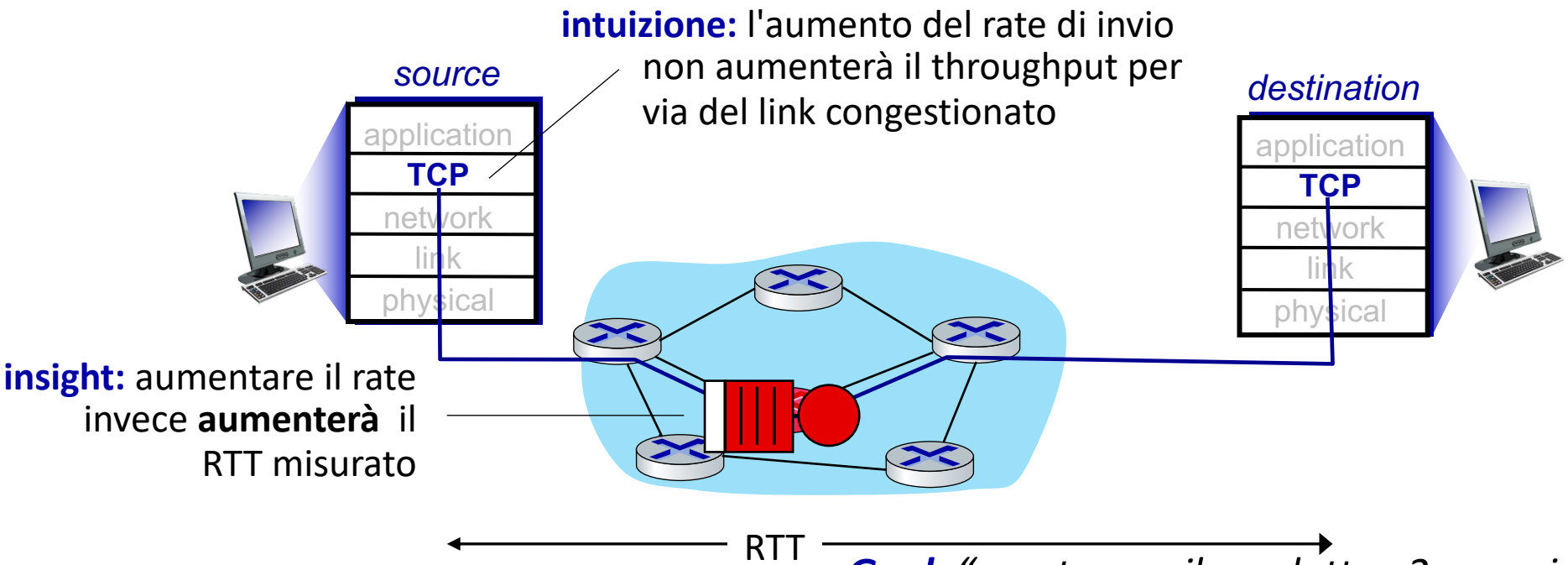
TCP e il "link collo di bottiglia" congestionato

- TCP (classico e CUBIC) aumenta la il rate del mittente finché non si verifica la perdita di pacchetti all'uscita di un router: il *bottleneck link*



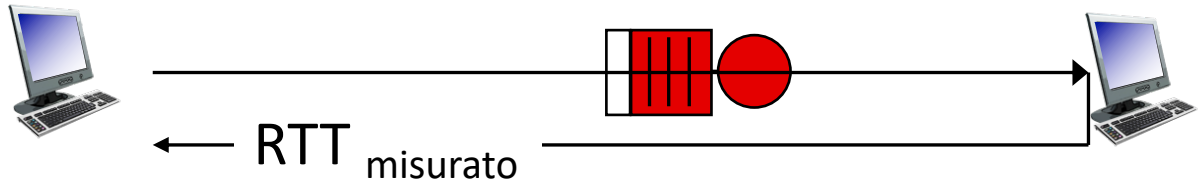
TCP e il "link collo di bottiglia" congestionato

- TCP (classico, CUBIC) aumenta la il rate del mittente finché non si verifica la perdita di pacchetti all'uscita di un router: il *bottleneck link*
- concentriamoci sul link congestionato



Delay-based TCP congestion control

Mantenere il condotto "quasi pieno": mantenere il bottleneck link occupato evitando ritardi/buffering elevati



$$\text{throughput misurato} = \frac{\text{\# byte inviati nell'ultimo RTT}}{\text{RTT}_{\text{misurato}}}$$

Approccio basato sul delay:

- RTT_{min} : RTT minimo osservato (= quando percorso non congestionato)
- throughput **non congestionato** dovrebbe essere cwnd / RTT_{min}

if measured throughput "very close" to uncongested throughput
    increase `cwnd` linearly /* since path not congested */
else if measured throughput "far below" uncongested throughout
    decrease `cwnd` linearly /* since path is congested */

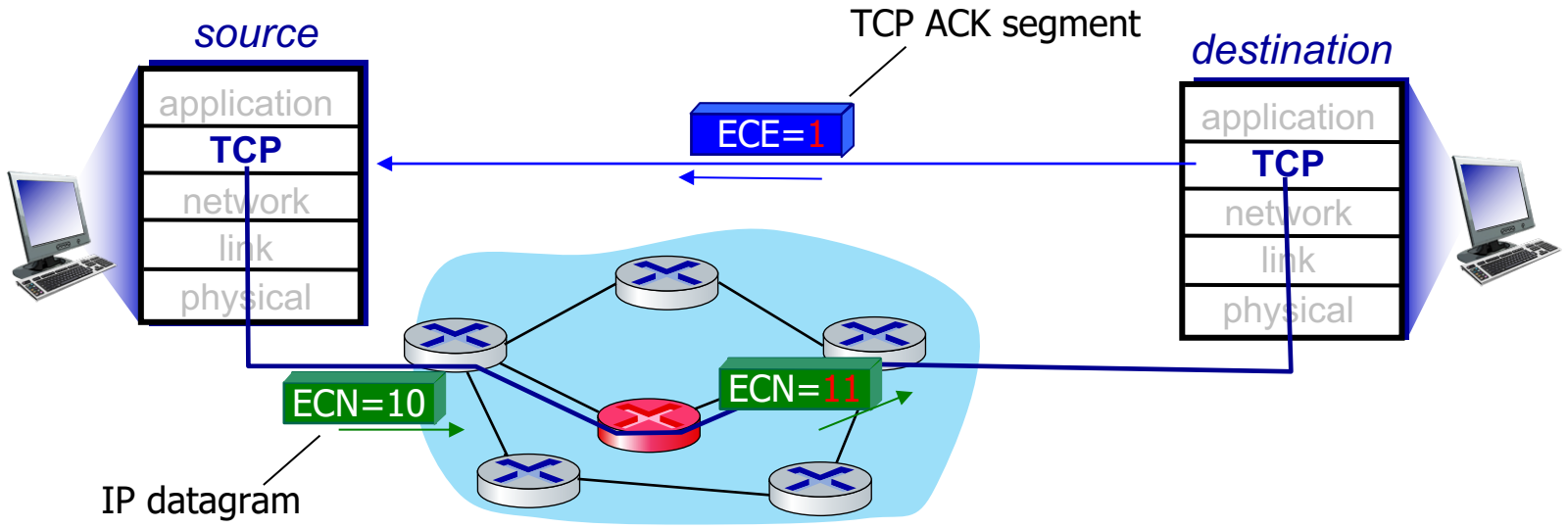
Delay-based TCP congestion control

- Innovazione: controllo della congestione senza indurre/forzare perdite!
- Massimizzare il throughput ("condotto quasi pieno...") mantenendo basso il ritardo ("...ma non troppo pieno")
- Alcune versioni di TCP usano questo approccio
  - BBR implementato sulla rete backbone (interna) di Google

Notifica esplicita di congestione (ECN)

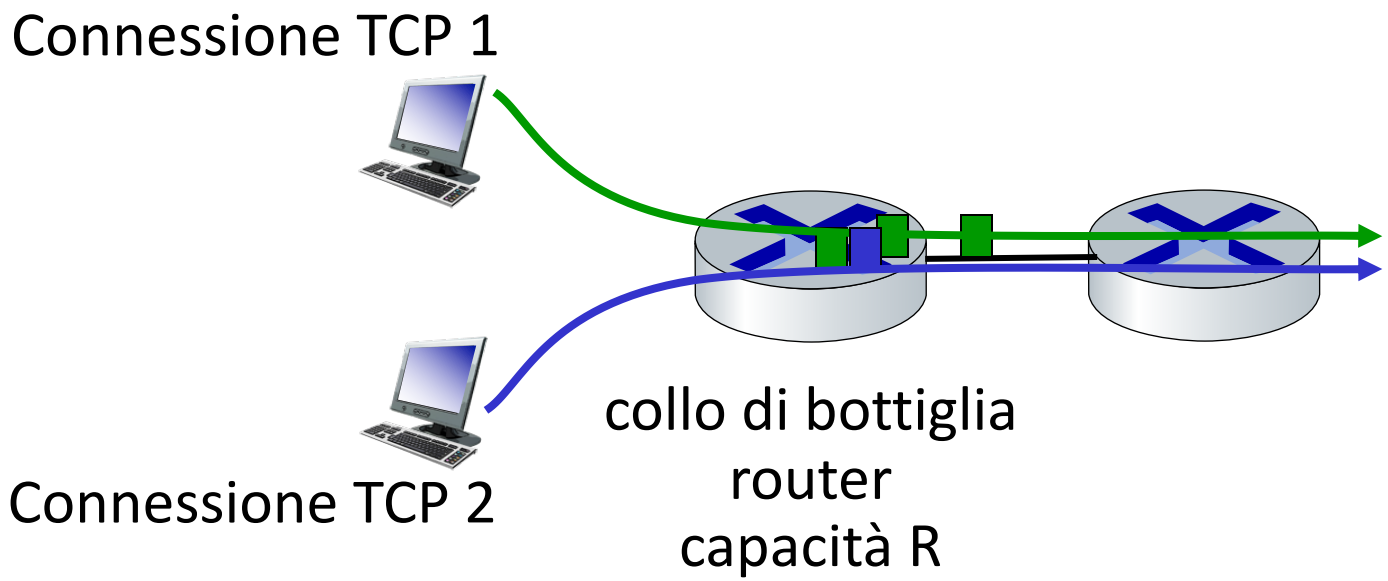
distribuzioni TCP spesso implementano il controllo della congestione *assistito dalla rete (network-assisted):*

- due bit nell'intestazione IP (campo type of service ToS) contrassegnati *dal router di rete* per indicare la congestione
  - *policy interna* per determinare la marcatura scelta dall'operatore di rete e la politica di scarto dei pacchetti
- indicazione di congestione trasportata al destinatario
- il destinatario imposta il bit ECE sul segmento ACK per notificare al mittente la congestione
- coinvolge sia IP (marcatura bit ECN dell'intestazione IP) che TCP (marcatura bit C,E dell'intestazione TCP)



Fairness di TCP

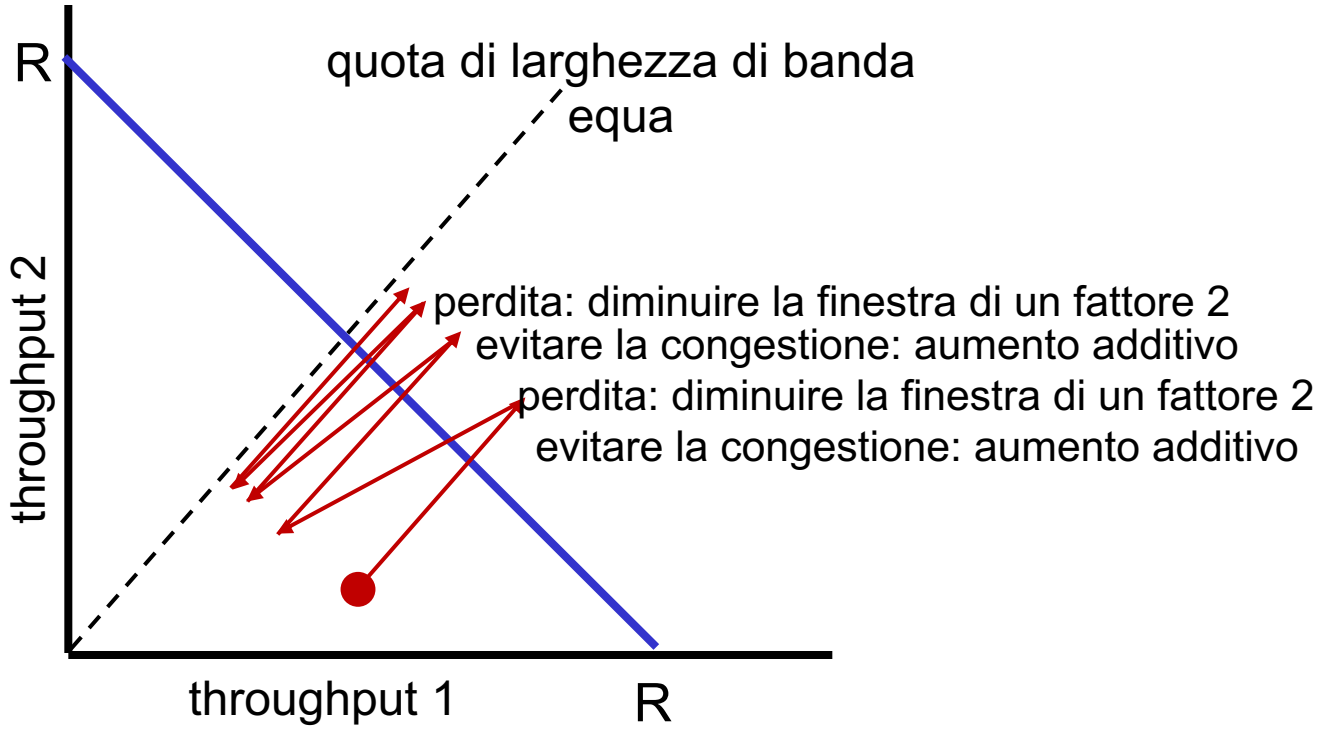
Obiettivo di equità: se *K* sessioni TCP condividono lo stesso collegamento a collo di bottiglia della larghezza di banda *R*, ciascuna dovrebbe avere una velocità media di *R/K*



D: TCP è equo?

Esempio: due sessioni TCP concorrenti:

- l'aumento additivo dà una pendenza di 1
- la diminuzione moltiplicativa riduce proporzionalmente il throughput



TCP è equo?

R: Sì, sotto ipotesi idealizzate:

- stesso RTT
- numero fisso di sessioni
- …

Fairness: tutte le app di rete devono essere "corrette"?

Fairness e UDP

- le app multimediali spesso non utilizzano il protocollo TCP
  - non voglio che la velocità venga limitata dal controllo della congestione
- usa invece UDP:
  - invia audio/video a velocità costante, tollera la perdita di pacchetti, potenzialmente soffoca TCP
- non vi è alcuna "polizia di Internet" per imporre l'uso del controllo della congestione

Fairness, connessioni TCP parallele

- l'applicazione può aprire *più* connessioni parallele tra due host
- i browser Web lo fanno, ad esempio, collegamento con rate R con 9 connessioni esistenti:
  - nuova app richiede 1 TCP, ottiene R/10

  vs.
  - nuova app richiede 11 TCP, ottiene R/2

Domande?

- Argomenti importanti
  - Formato dei protocolli principali visti finora (**DNS**, HTTP, UDP, TCP, HTTP, FTP)
  - saper prevedere per i protocolli principali come un client e un server rispondono in varie situazioni
  - Calcolo di ritardi di trasmissione, throughput e accodamenti
- Esonero
  - Una parte V/F
  - Una parte di esercizi
  - Una parte risposte aperte

Livello di trasporto: sommario

- Servizi a livello di trasporto
- Multiplexing e demultiplexing
- Trasporto senza connessione: UDP
- Principi di trasferimento affidabile dei dati
- Trasporto orientato alla connessione: TCP
  - struttura del segmento
  - trasferimento affidabile dei dati
  - controllo del flusso
  - gestione della connessione
- Principi di controllo della congestione
- Controllo della congestione TCP
- Evoluzione della funzionalità del livello di trasporto

Funzionalità a livello di trasporto in evoluzione

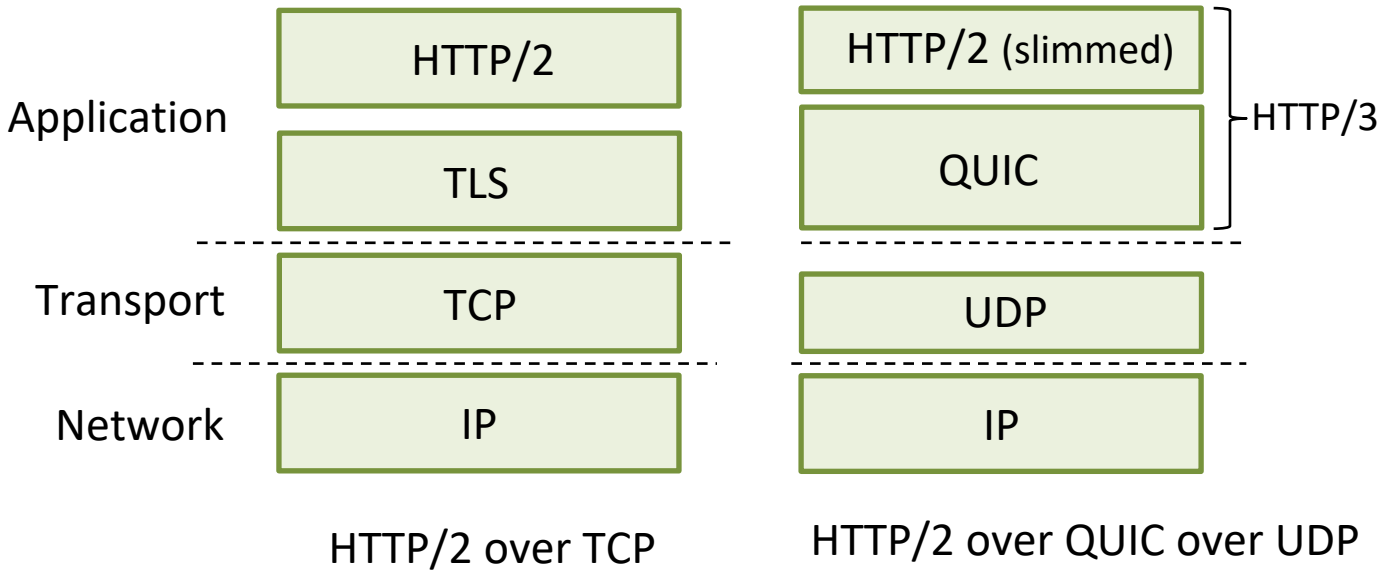
- TCP, UDP: principali protocolli di trasporto da 40 anni
- diverse varianti di TCP sviluppate, per scenari specifici:

Scenario	Challenges
Long, fat pipes (large data transfers)	Many packets “in flight”; loss shuts down pipeline
Wireless networks	Loss due to noisy wireless links, mobility; TCP treat this as congestion loss
Long-delay links	Extremely long RTTs
Data center networks	Latency sensitive
Background traffic flows	Low priority, “background” TCP flows

- Trend: spostare le funzioni del livello di trasporto al livello applicazione, sopra UDP
  - HTTP/3: QUIC

QUIC: Quick UDP Internet Connections

- protocollo a livello di applicazione, sopra UDP
  - aumentare le prestazioni di HTTP
  - implementato su molti server e app di Google (Chrome, app YouTube per dispositivi mobili)



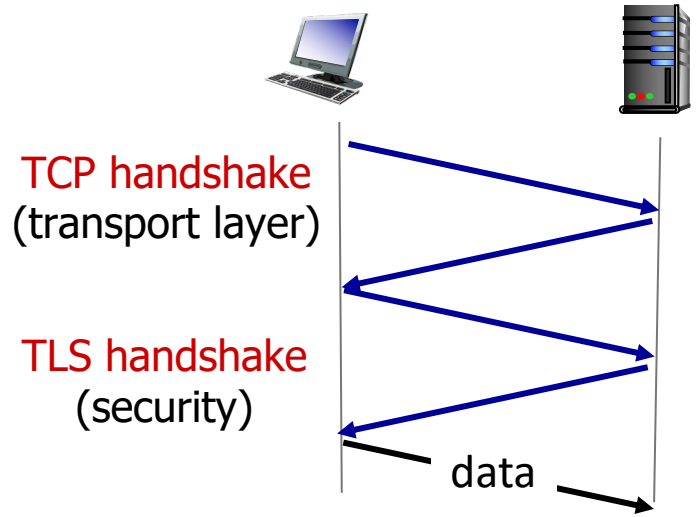
QUIC: Quick UDP Internet Connections

adotta gli approcci che abbiamo studiato per la creazione di connessioni, il controllo degli errori, il controllo della congestione

- **controllo degli errori e della congestione:** "I lettori che hanno familiarità con il rilevamento delle perdite e il controllo della congestione del TCP troveranno qui algoritmi simili a quelli ben noti del TCP." [dalla specifica QUIC]
- **creazione della connessione:** affidabilità, controllo della congestione, autenticazione, crittografia, connessione rapida in un RTT

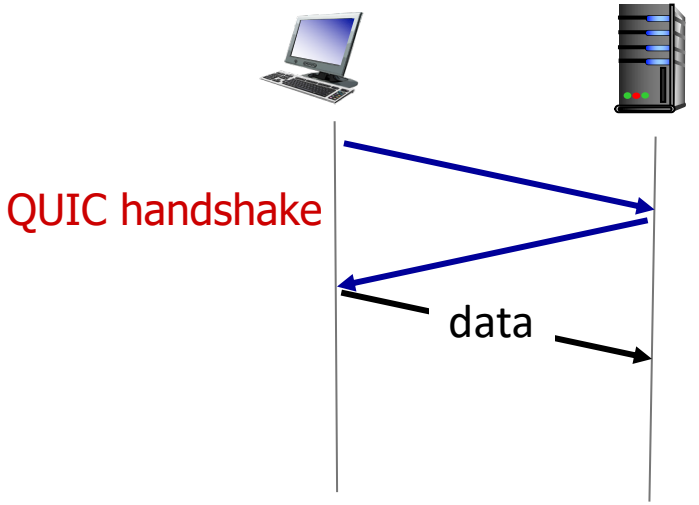
- più "stream" a livello di applicazione multiplexati su una singola connessione QUIC
  - trasferimento dati affidabile separato, sicurezza
  - controllo della congestione in comune

QUIC: Stabilire la connessione



TCP (reliability, congestion control state) + TLS (authentication, crypto state)

- 2 serial handshakes

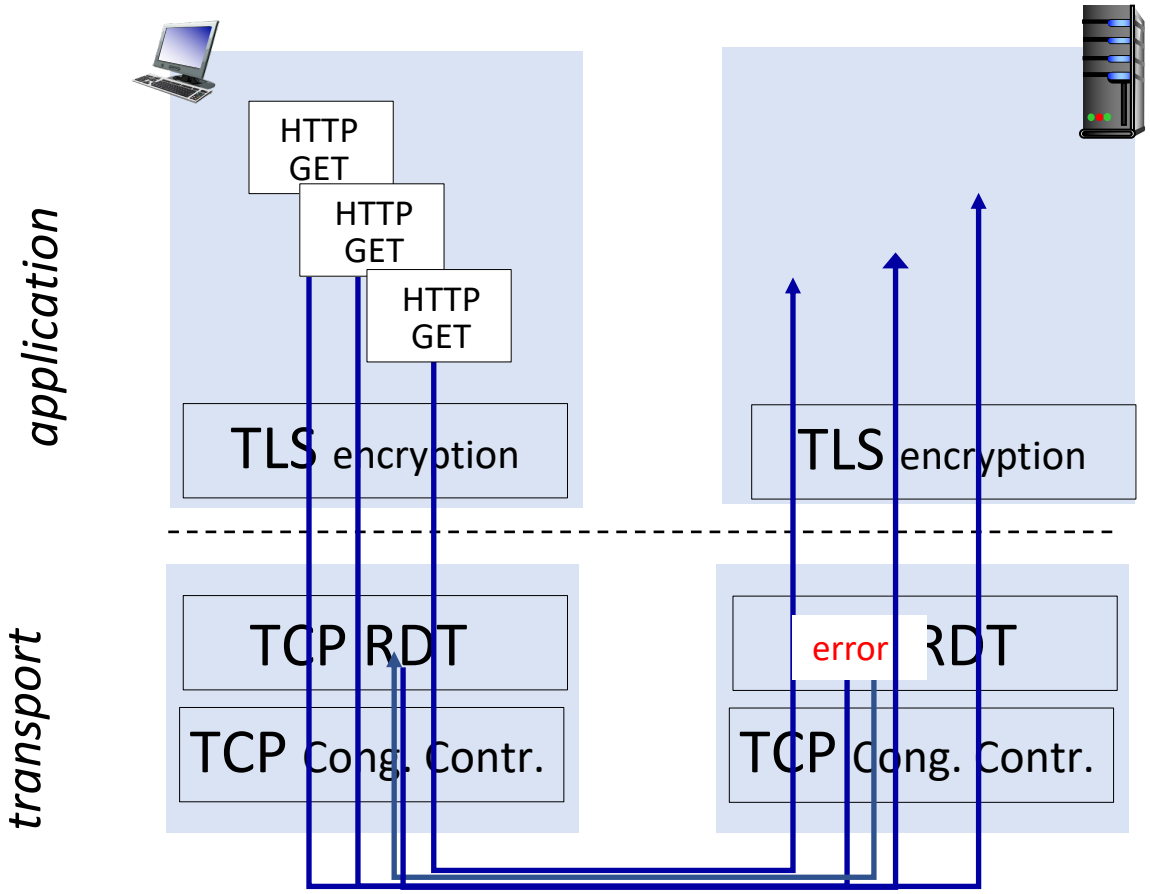


QUIC: reliability, congestion control, authentication, crypto state

- 1 handshake

41

QUIC: streams: parallelism, no HOL blocking



(a) HTTP 1.1