



POLITECNICO
MILANO 1863



Fondamenti di TELECOMUNICAZIONI

Pierpaolo Boffi

Fondamenti di TELECOMUNICAZIONI



POLITECNICO
MILANO 1863



3 – Ritardi e Throughput

**Tempo di trasmissione, Propagazione,
Altri ritardi, Throughput**

Velocità di trasmissione

- E' la velocità (rate) R con la quale l'informazione digitale viene trasmessa su una linea
 - E' misurata in bit/s (bps)
- (vedremo come la velocità sia determinata dal mezzo trasmissivo e/o dalle interfaccia)



- Unità di misura:

1 **kbps** (kb/s) = 10^3 bps

1 **Mbps** (Mb/s) = 10^6 bps

1 **Gbps** (Gb/s) = 10^9 bps

1 **Byte** = 8 bit

1 **kB** = 10^3 B

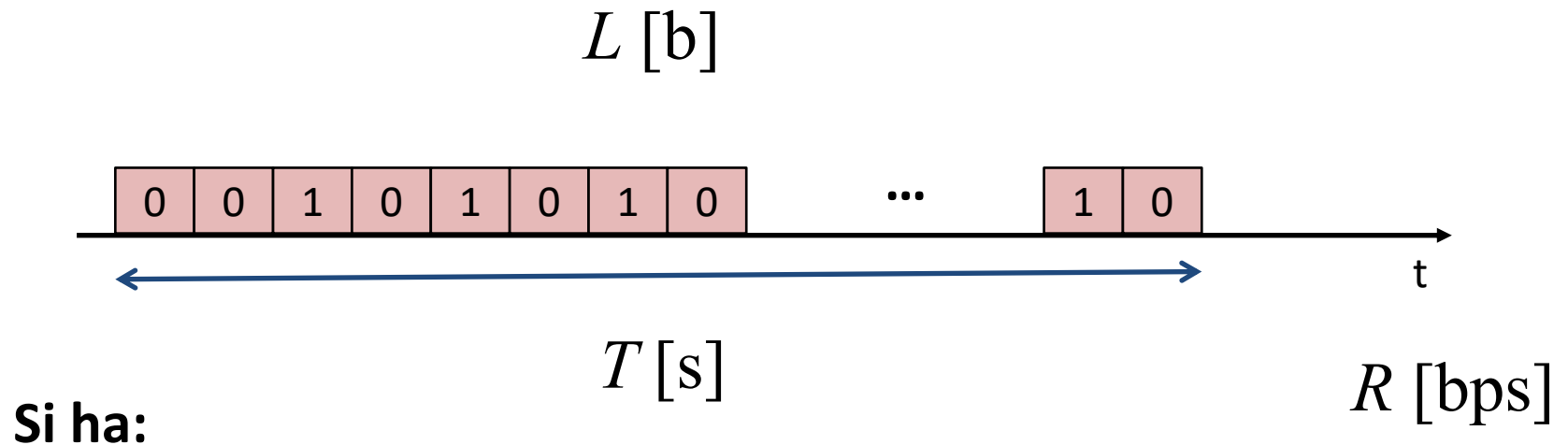
1 **MB** = 10^6 B

1 **GB** = 10^9 B



Tempo di trasmissione

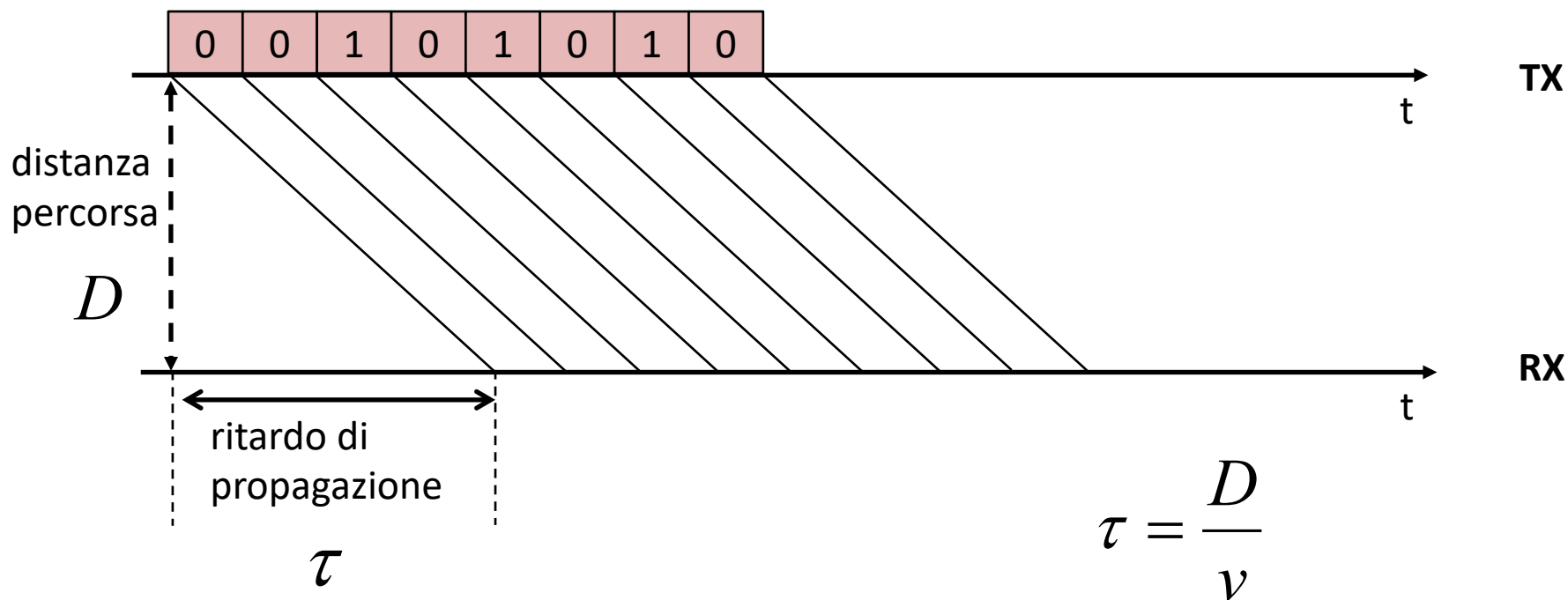
- Il tempo T per trasmettere L bits dipende dalla velocità di trasmissione R



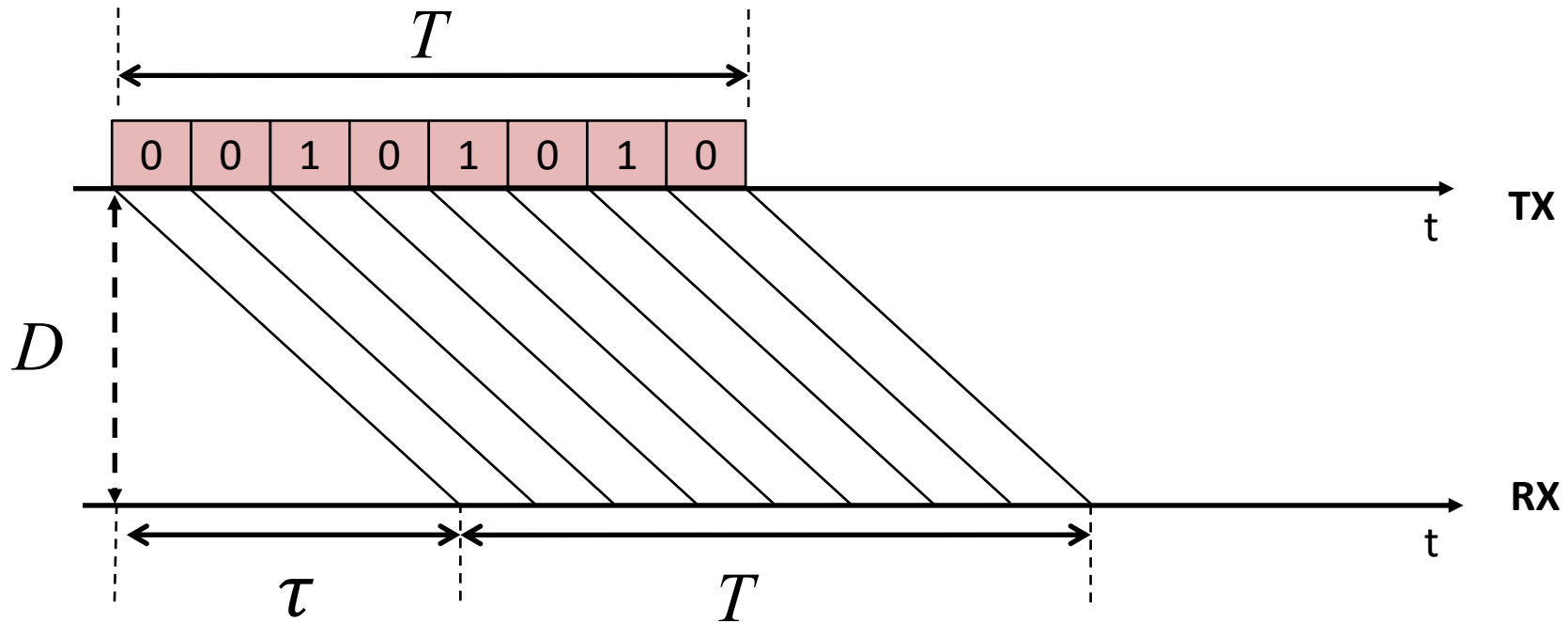
$$T = \frac{L}{R}$$

Ritardo di propagazione

- Il tempo τ affinché un impulso trasmesso dal trasmettitore TX raggiunga il ricevitore RX dipende dalla distanza D (in m) e dalla velocità di propagazione v (in m/s , prossima alla velocità della luce)



Tempi di attraversamento del canale

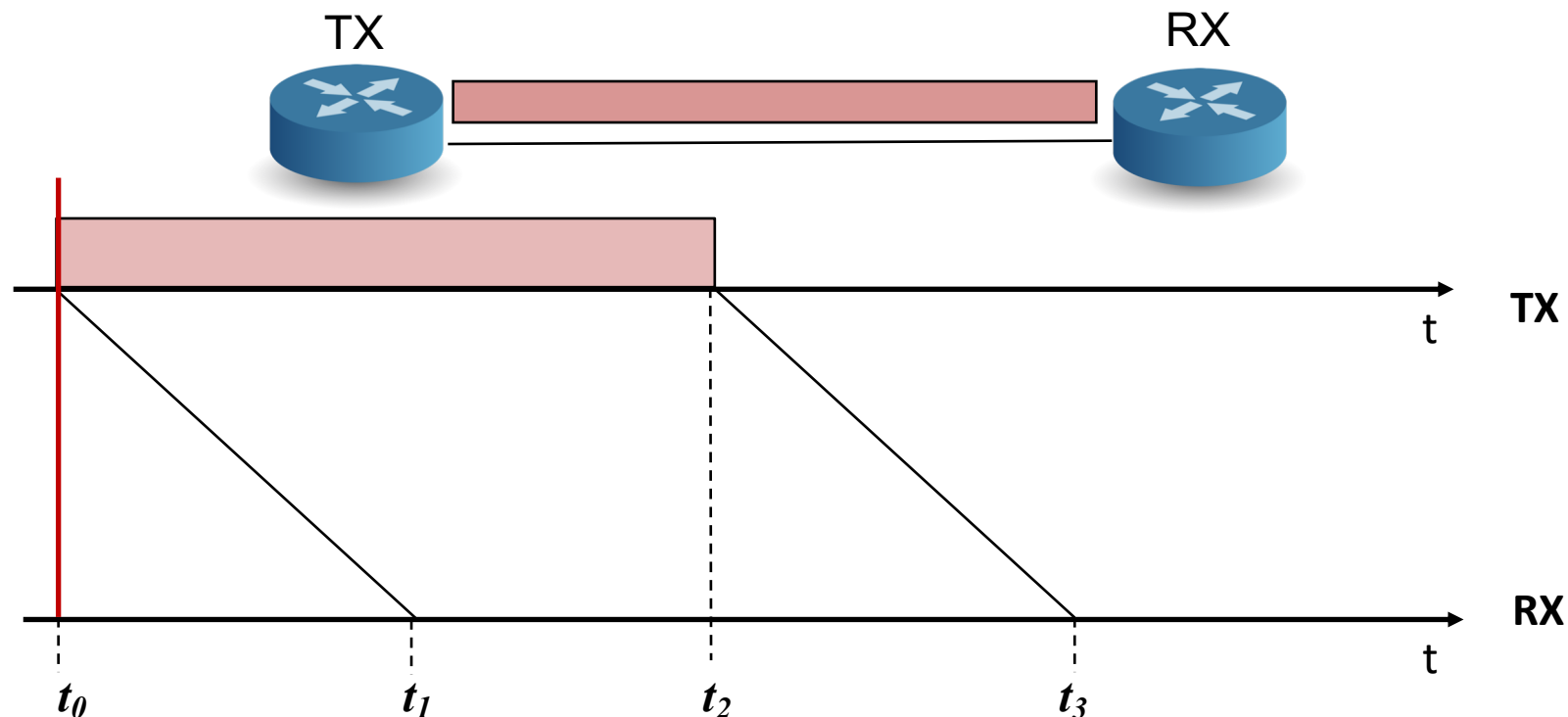


Ritardo fra la trasmissione del primo bit e la ricezione dell'ultimo

$$T_{tot} = T + \tau$$



Tempi di attraversamento del canale



t_0 =inizio trasmissione

t_1 =arrivo primo bit

t_2 =fine trasmissione

t_3 =arrivo ultimo bit

Tempo di trasmissione:

$$T = t_2 - t_0 = t_3 - t_1 = L/R \quad L = \text{lunghezza del pacchetto [bit]}$$

R =velocità di trasm. [bit/s]

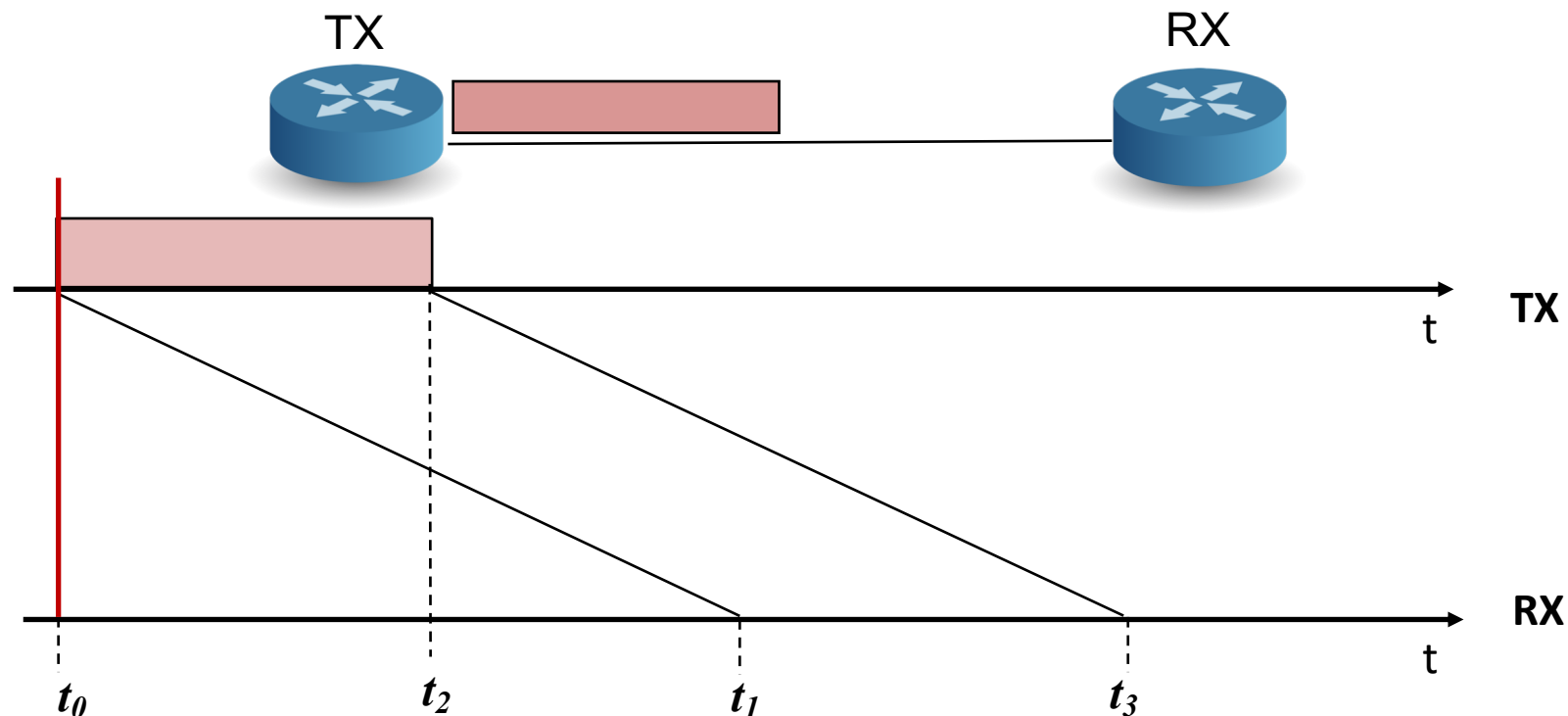
Ritardo di propagazione:

$$\tau = t_1 - t_0 = t_3 - t_2 = D/v \quad D = \text{lunghezza del coll. [m]}$$

v =velocità di prop. [m/s]



Tempi di attraversamento del canale



t_0 =inizio trasmissione

t_1 =arrivo primo bit

t_2 =fine trasmissione

t_3 =arrivo ultimo bit

Tempo di trasmissione:

$$T = t_2 - t_0 = t_3 - t_1 = L/R \quad L = \text{lunghezza del pacchetto [bit]}$$

R =velocità di trasm. [bit/s]

Ritardo di propagazione:

$$\tau = t_1 - t_0 = t_3 - t_2 = D/v \quad D = \text{lunghezza del coll. [m]}$$

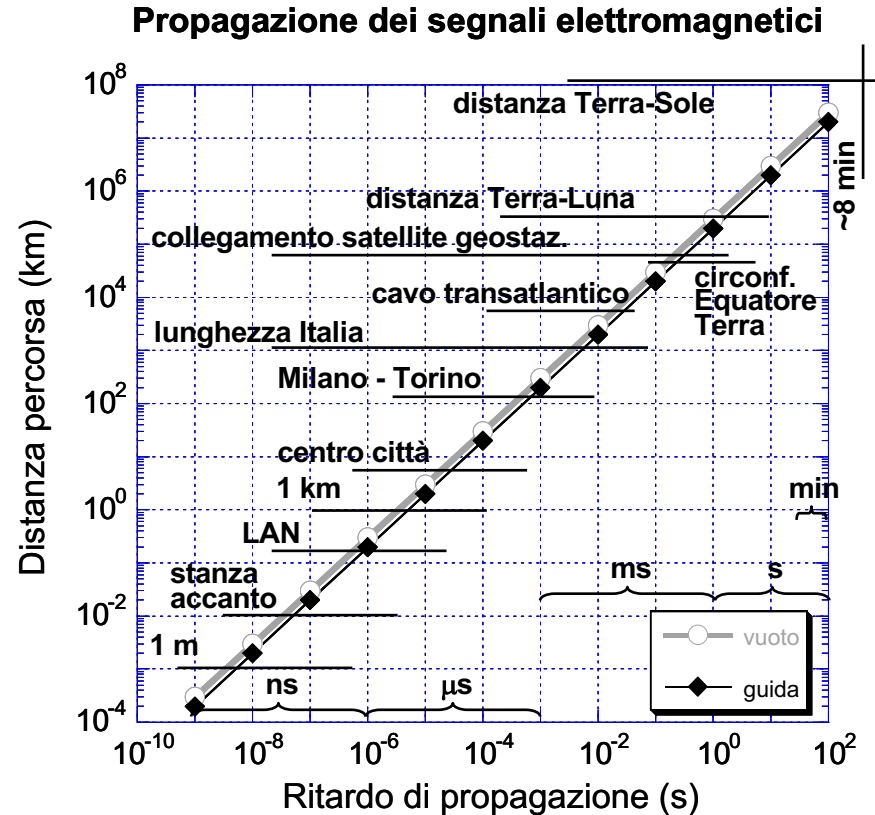
v =velocità di prop. [m/s]



Primo “triangolo magico”

$$\begin{aligned} c_x &= \frac{d}{\tau} \\ \tau &= \frac{d}{c_x} \\ d &= \tau \cdot c_x \end{aligned}$$

- c_x = Velocità di propagazione dei segnali elettromagnetici
 - Propagazione libera (onde radio, vuoto, aria): $c_0 \cong 300000 \text{ km/s}$
 - Propagazione guidata (cavi in rame, fibra ottica, guide d'onda): $c_g \cong 200000 \text{ km/s}$
- d = distanza percorsa [km]
- τ = ritardo di propagazione [s]



Secondo “triangolo magico”

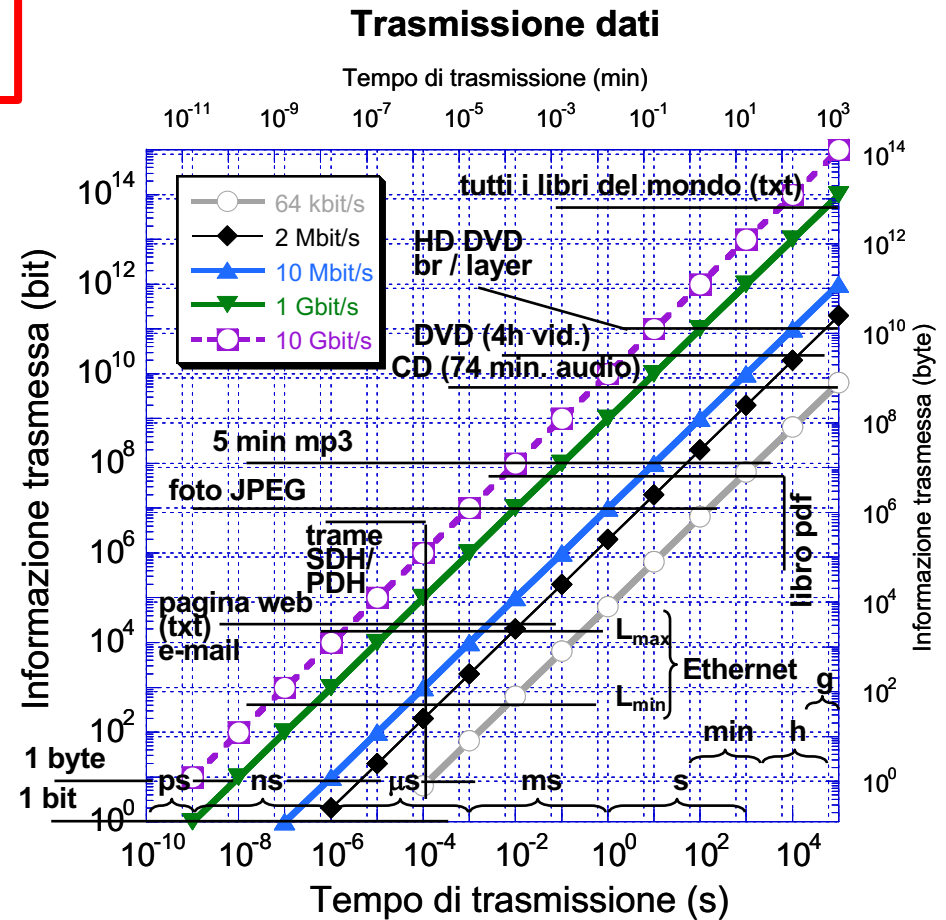
$$D = T + \tau$$

$$C = \frac{L}{T}$$

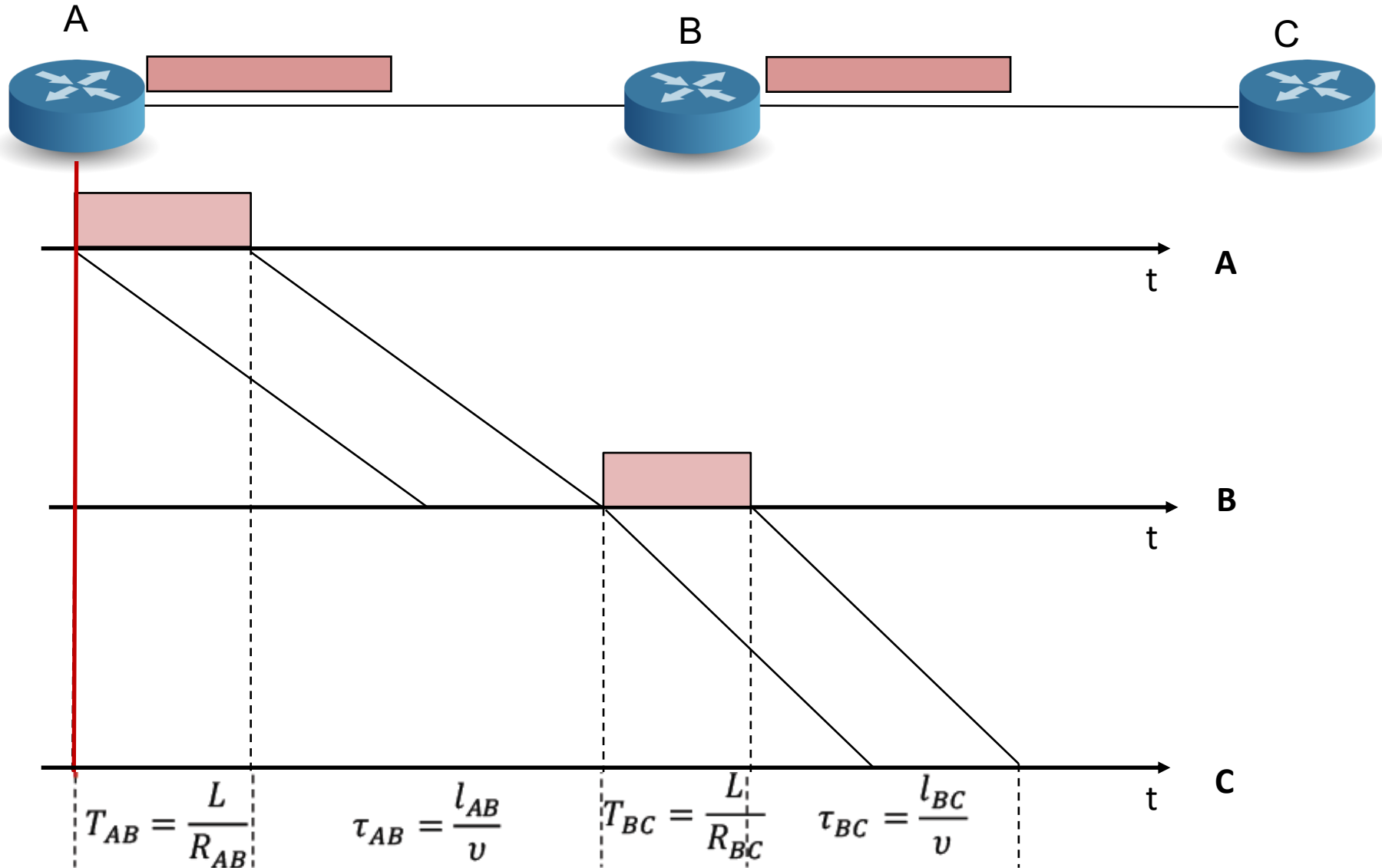
$$L = T \cdot C$$

$$T = \frac{L}{C}$$

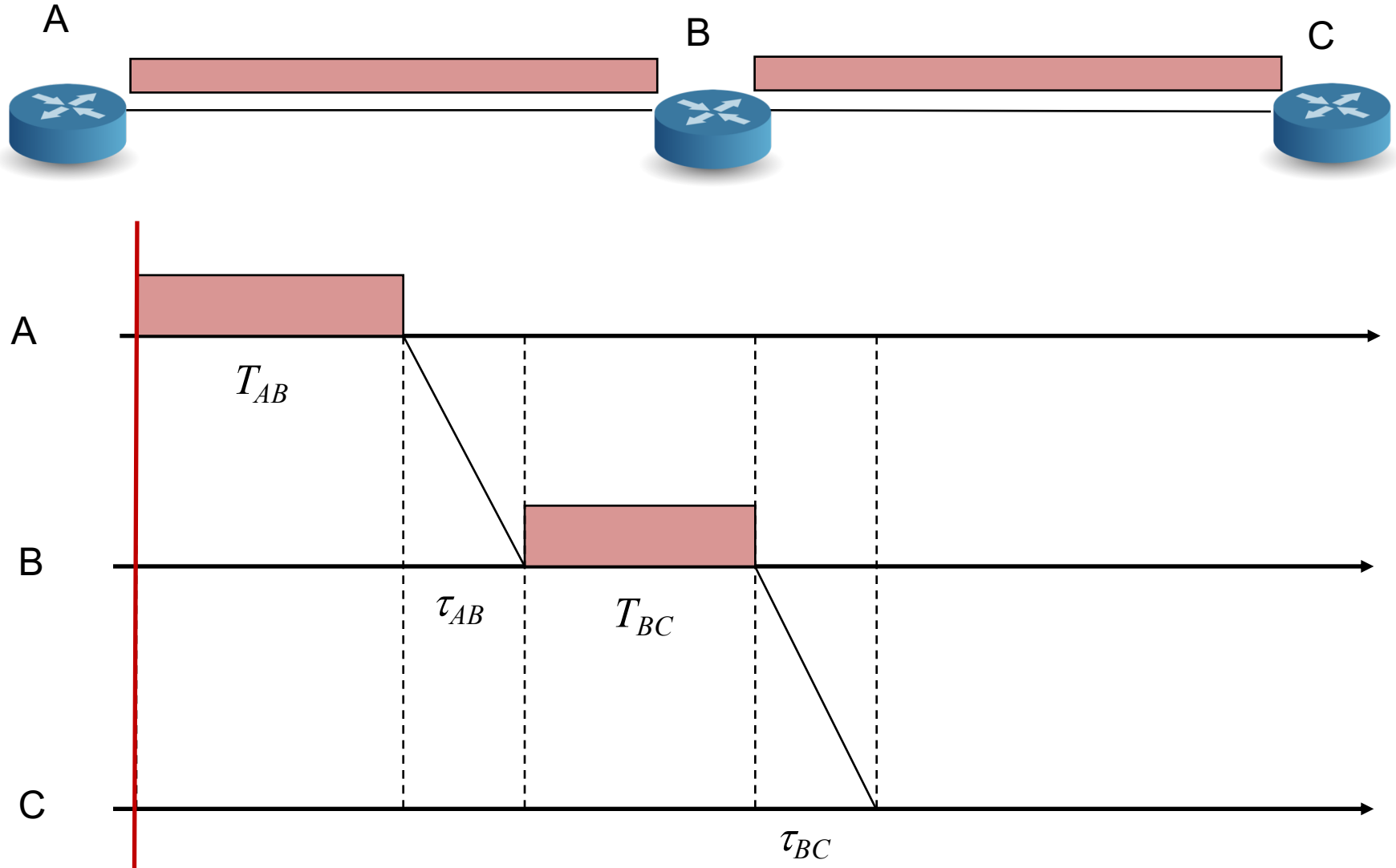
- C = Velocità di trasmissione della sorgente [bit/s]
- L = quantità d'informazione trasmessa [bit]
- T = tempo di trasmissione [s]



Store and forward

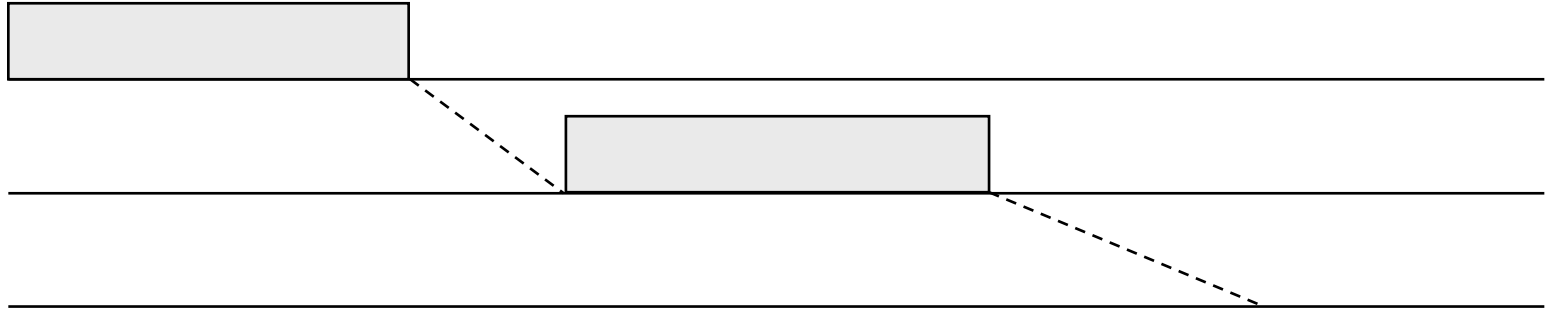


Store and forward

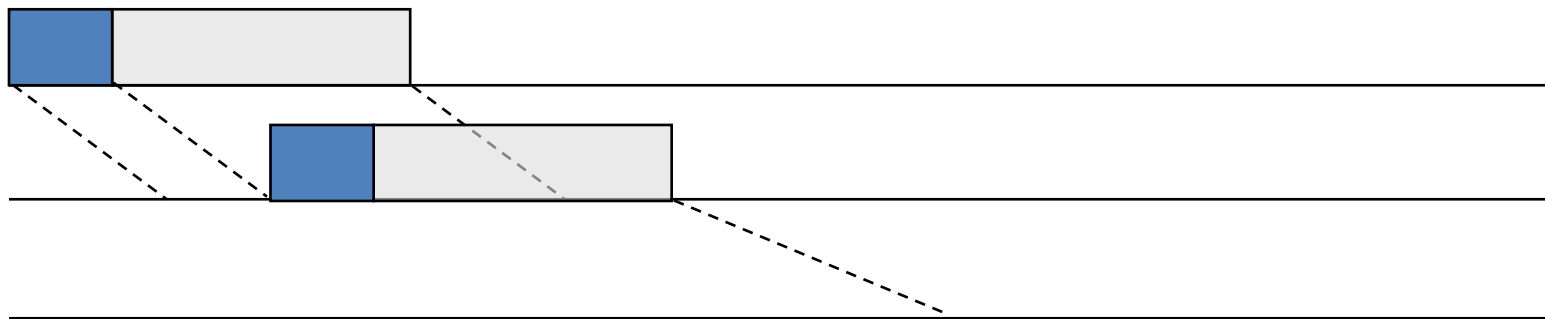


Commutazione a Pacchetto Cut-Through

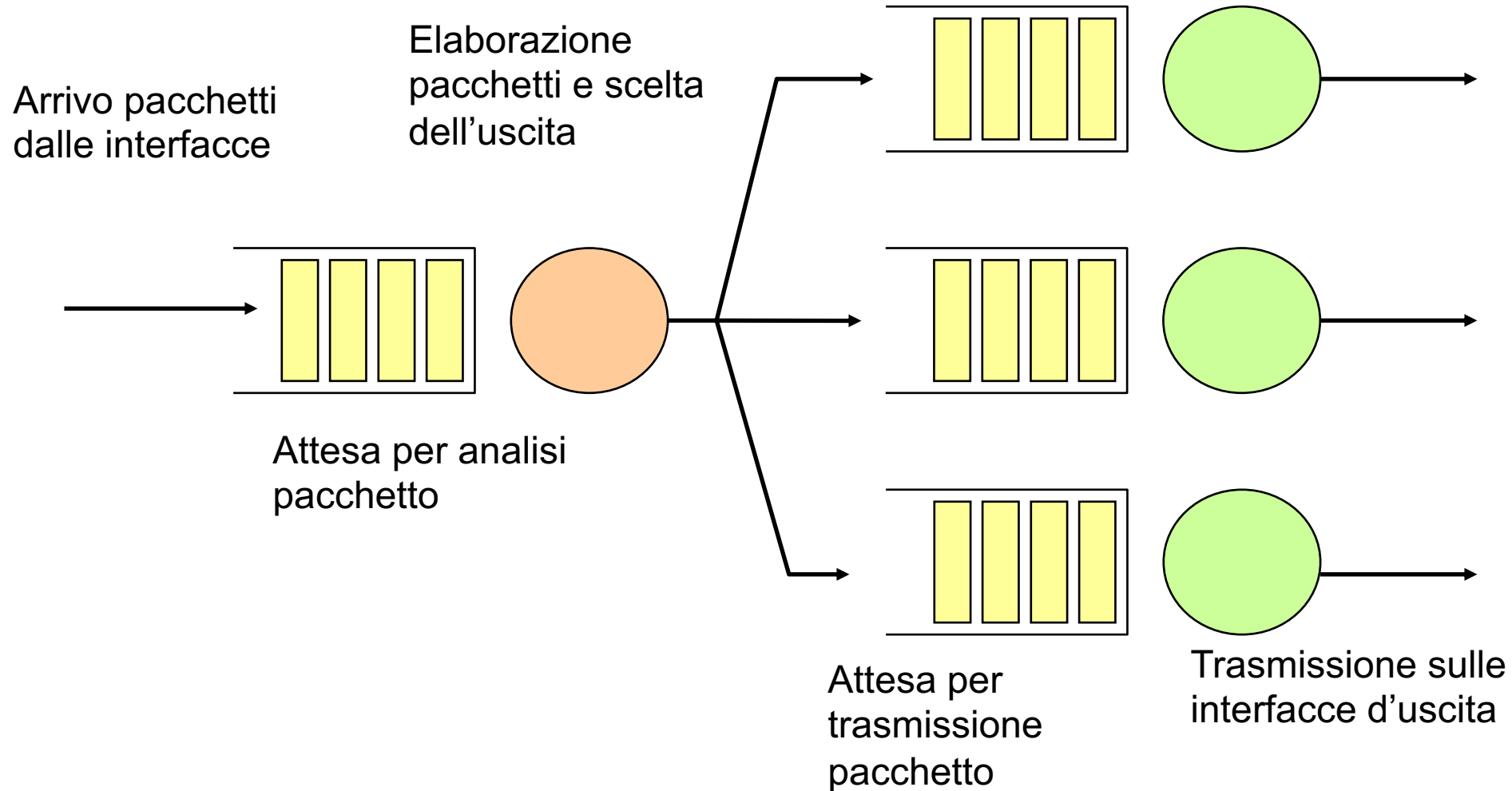
- ***Store-and-forward***: il pacchetto deve essere completamente ricevuto prima di essere ritrasmesso



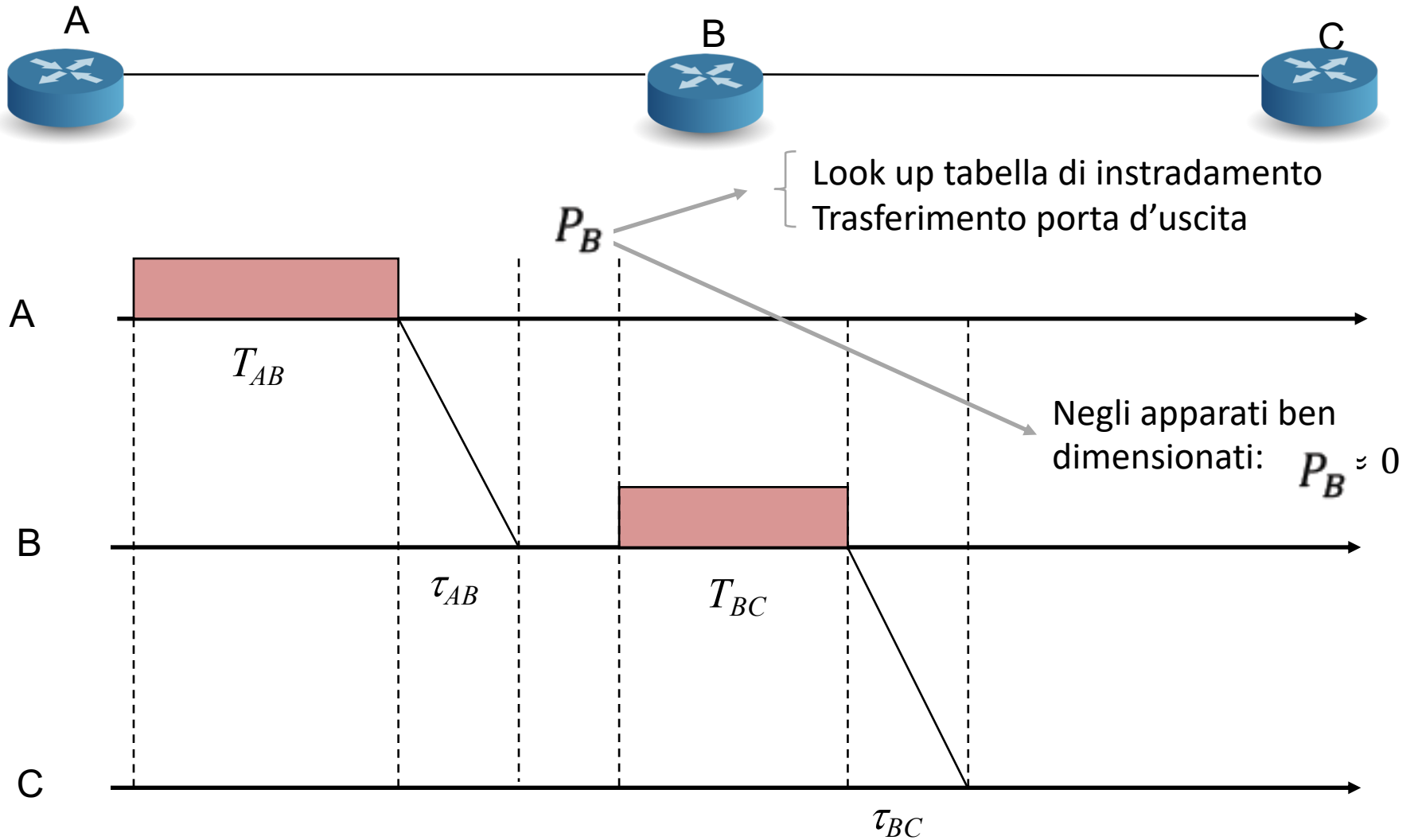
- ***Cut-Through***: il pacchetto viene ritrasmesso alla completa ricezione dell'header



Modello di un nodo



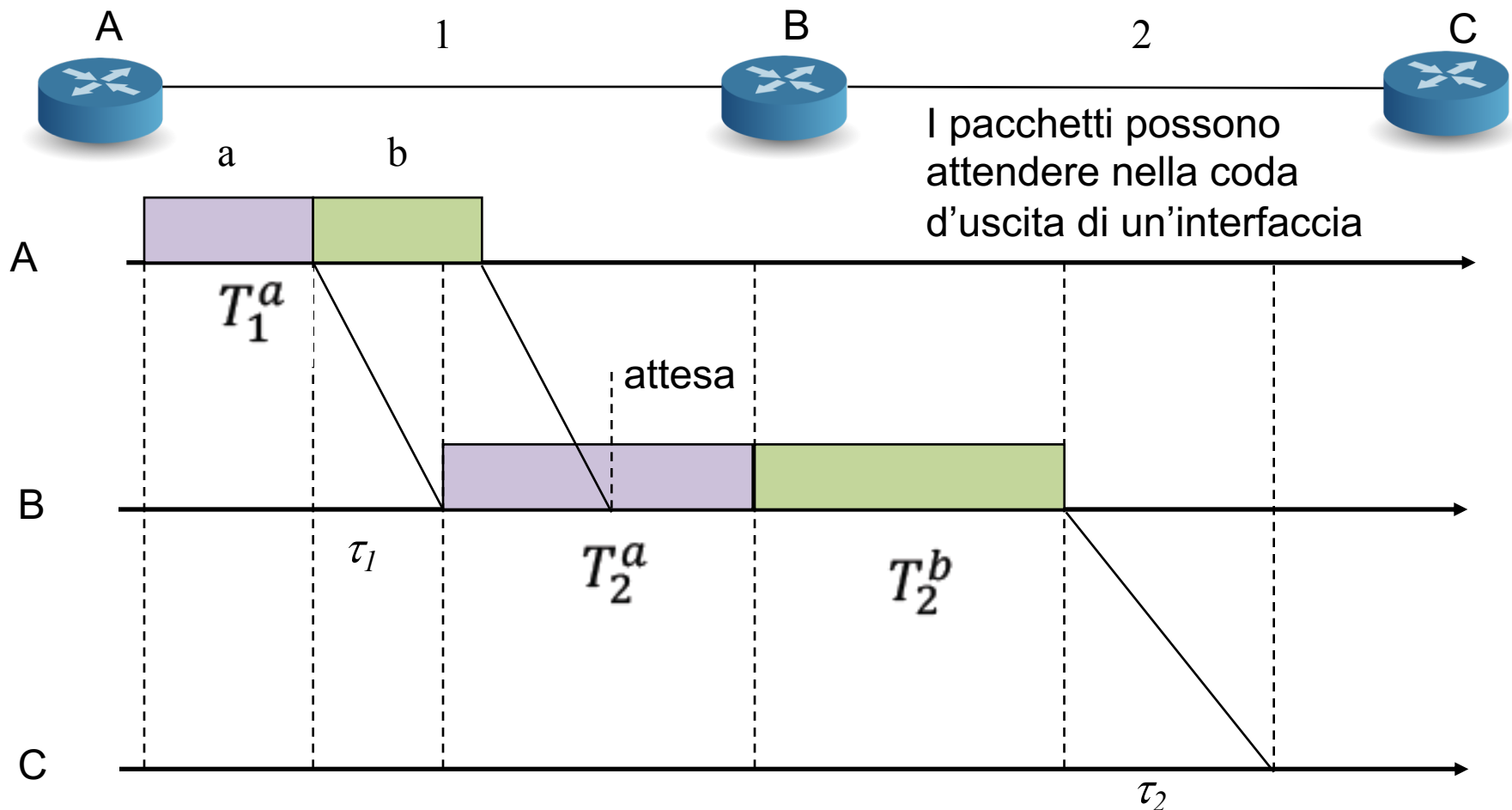
Tempo di elaborazione



Ritardo di accodamento

- Se la linea di uscita è occupata occorre aspettare in coda

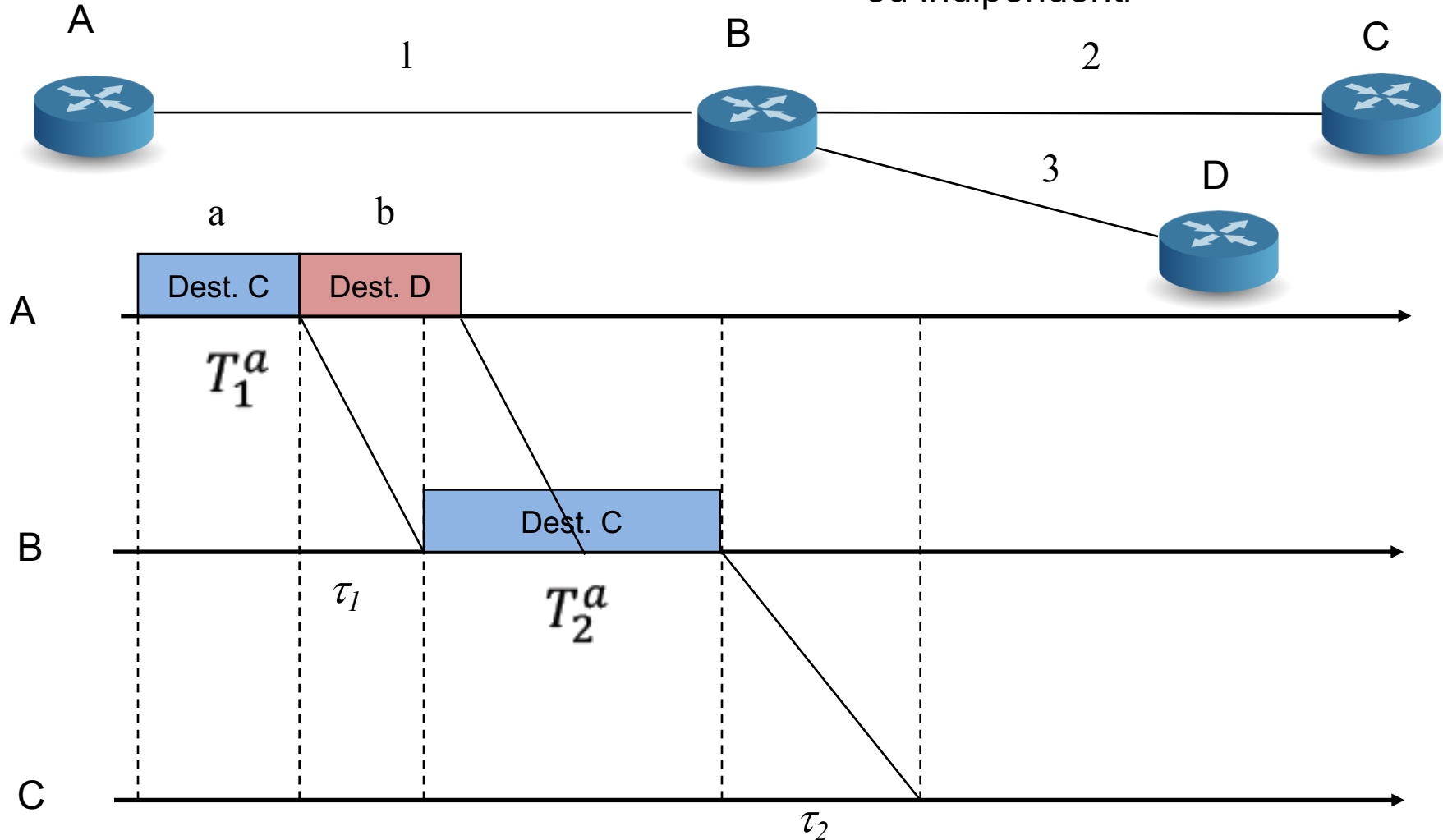
Esempio 1



Ritardo di accodamento

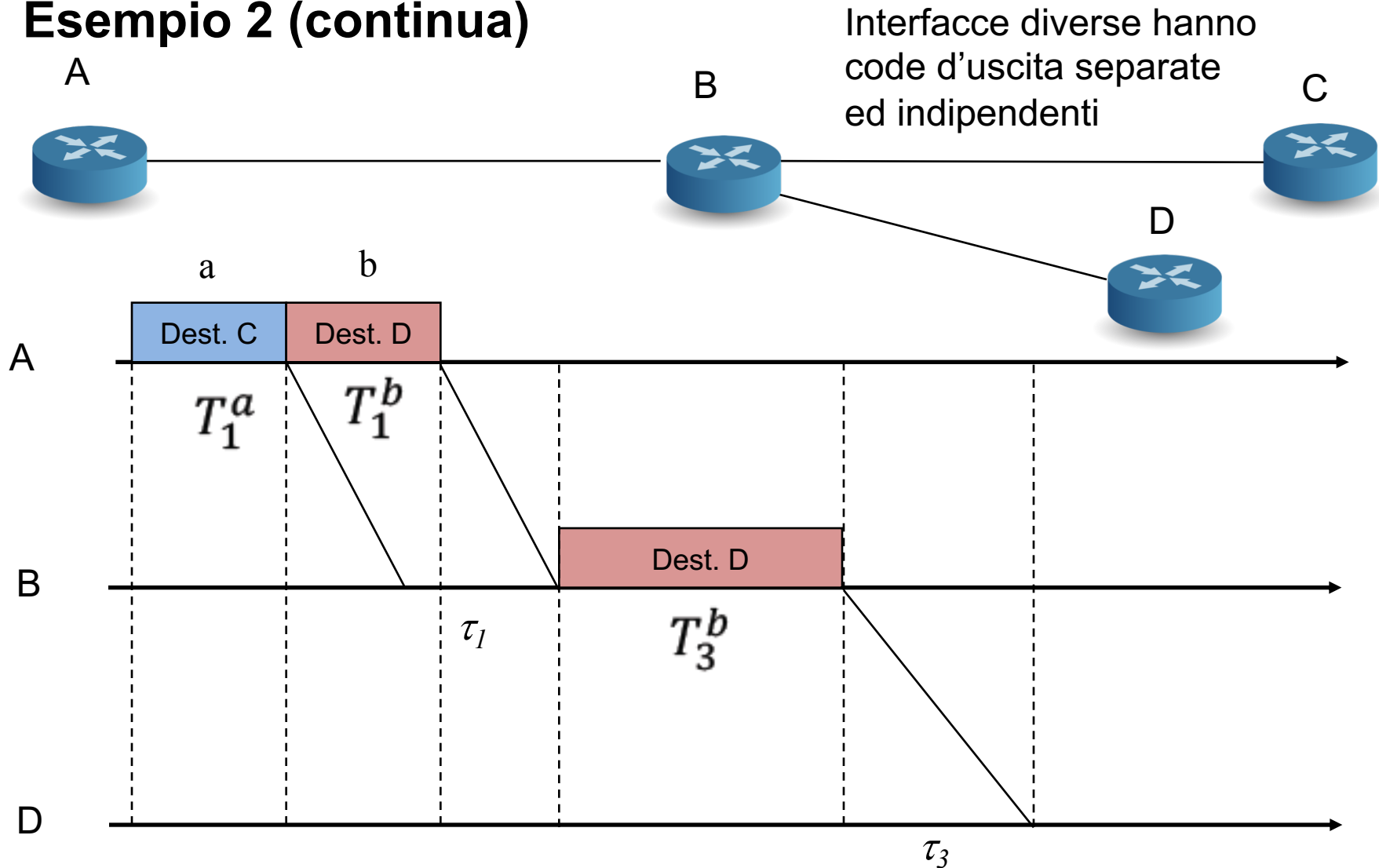
Esempio 2

Interfacce diverse hanno
code d'uscita separate
ed indipendenti



Ritardo di accodamento

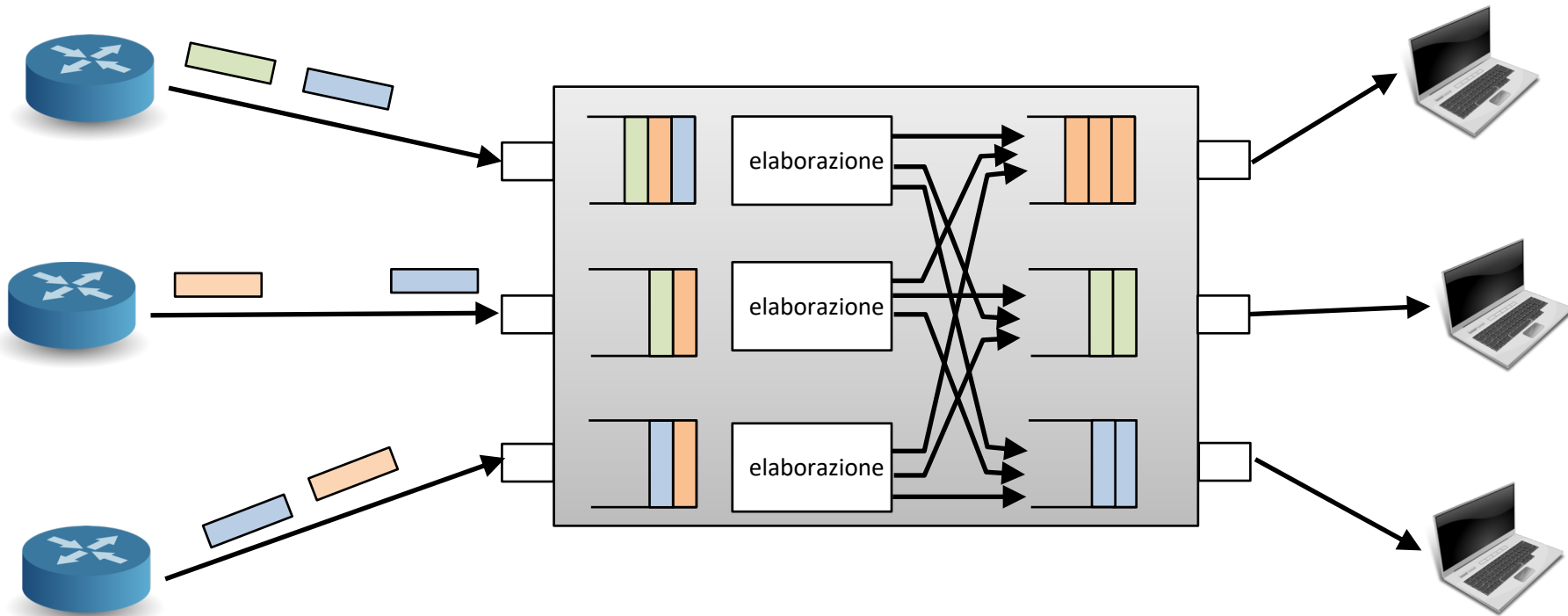
Esempio 2 (continua)



Ritardo di accodamento

Multiplazione statistica

Più in generale il **ritardo di accodamento** dipende dalla **multiplazione statistica** dovuto all'**arrivo asincrono dei pacchetti** alle code d'uscita (trasmissione)



Ritardo di Accodamento

Del **ritardo di accodamento medio** T_a si possono fare dei modelli statistici basati sulla **teoria delle code**:

R = velocità del link [b/s]

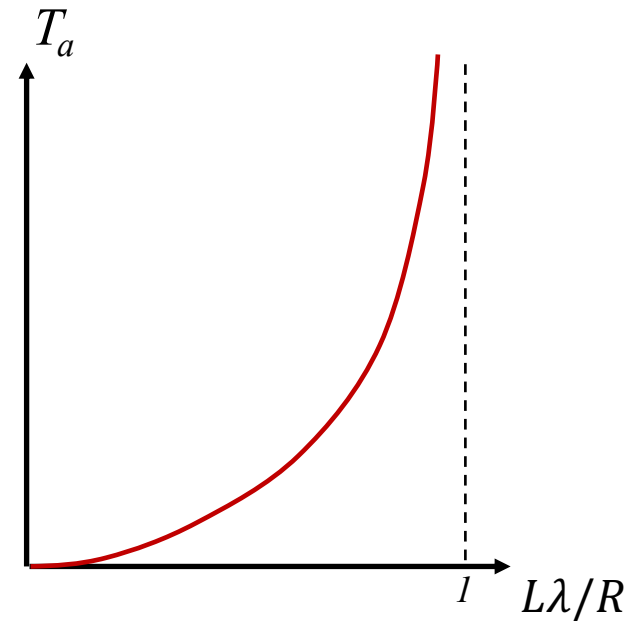
L = lunghezza pacchetto [bits]

λ = frequenza di arrivo dei pacchetti [pack/s]

Intensità di traffico = $L\lambda/R \sim 0$

$L\lambda/R \sim 0$: ritardo in coda piccolo

$L\lambda/R \rightarrow 1$: il ritardo tende all'infinito



Ritardo di Accodamento

Del **ritardo di accodamento medio** T_a si possono fare dei modelli statistici basati sulla **teoria delle code**:

R = velocità del link [b/s]

L = lunghezza pacchetto [bits]

λ = frequenza di arrivo dei pacchetti [pack/s]

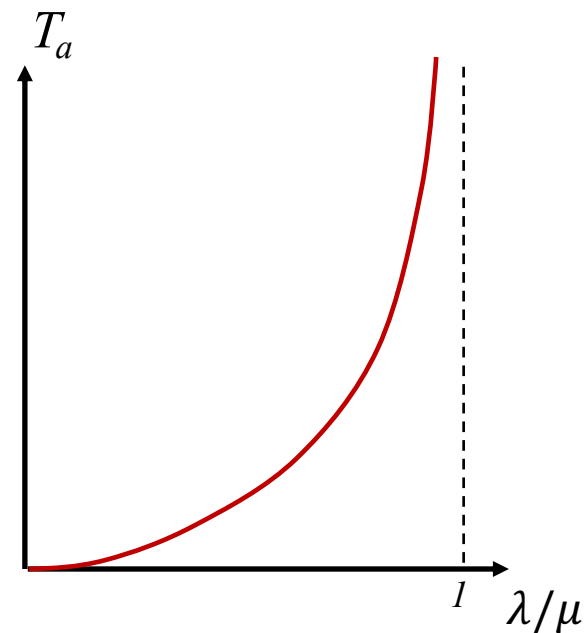
Definiamo:

μ = frequenza di trasmissione dei pacchetti [pack/s]

Si ha:

$$\mu = \frac{R}{L}$$

Si può mostrare che sotto alcune condizioni sulla statistica degli arrivi e la distribuzione delle lunghezze dei pacchetti:

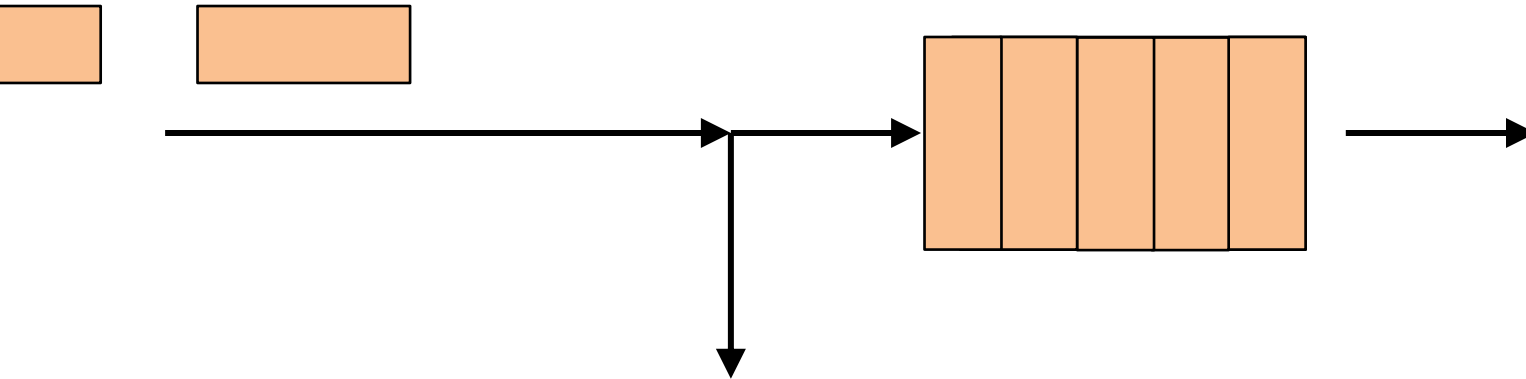


$$T_a = \frac{1}{\mu - \lambda} - \frac{1}{\mu}$$



Perdite di pacchetti in Internet

- Le code hanno **dimensioni limitate**
- In **congestione** (coda piena) i pacchetti che arrivano vengono **scartati**
- I pacchetti persi possono essere **ritrasmessi** o meno a seconda del livello/protocollo che gestisce l'evento di perdita (vedremo esempi a livello di linea e di trasporto).

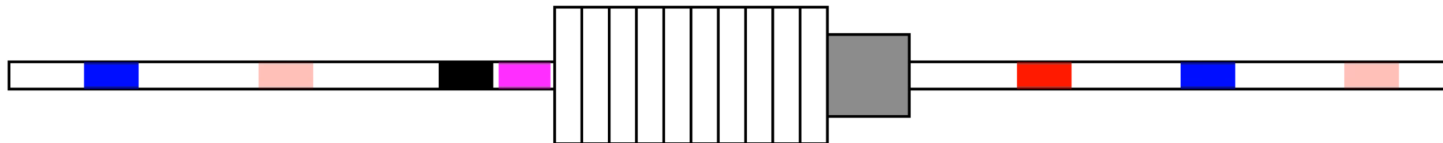


Ritardo di accodamento

Multiplazione statistica

Più in generale il **ritardo di accodamento** dipende dalla **multiplazione statistica** dovuto all'arrivo asicrono dei pacchetti alle code d'uscita (trasmissione)

Emission rate Transmission rate



112 msec
0 packets dropped out of 32

Emission rate Transmission rate



84 msec
1 packets dropped out of 35

