

Livello di collegamento: servizi offerti, sottolivelli DLC e MAC, protocolli MAC

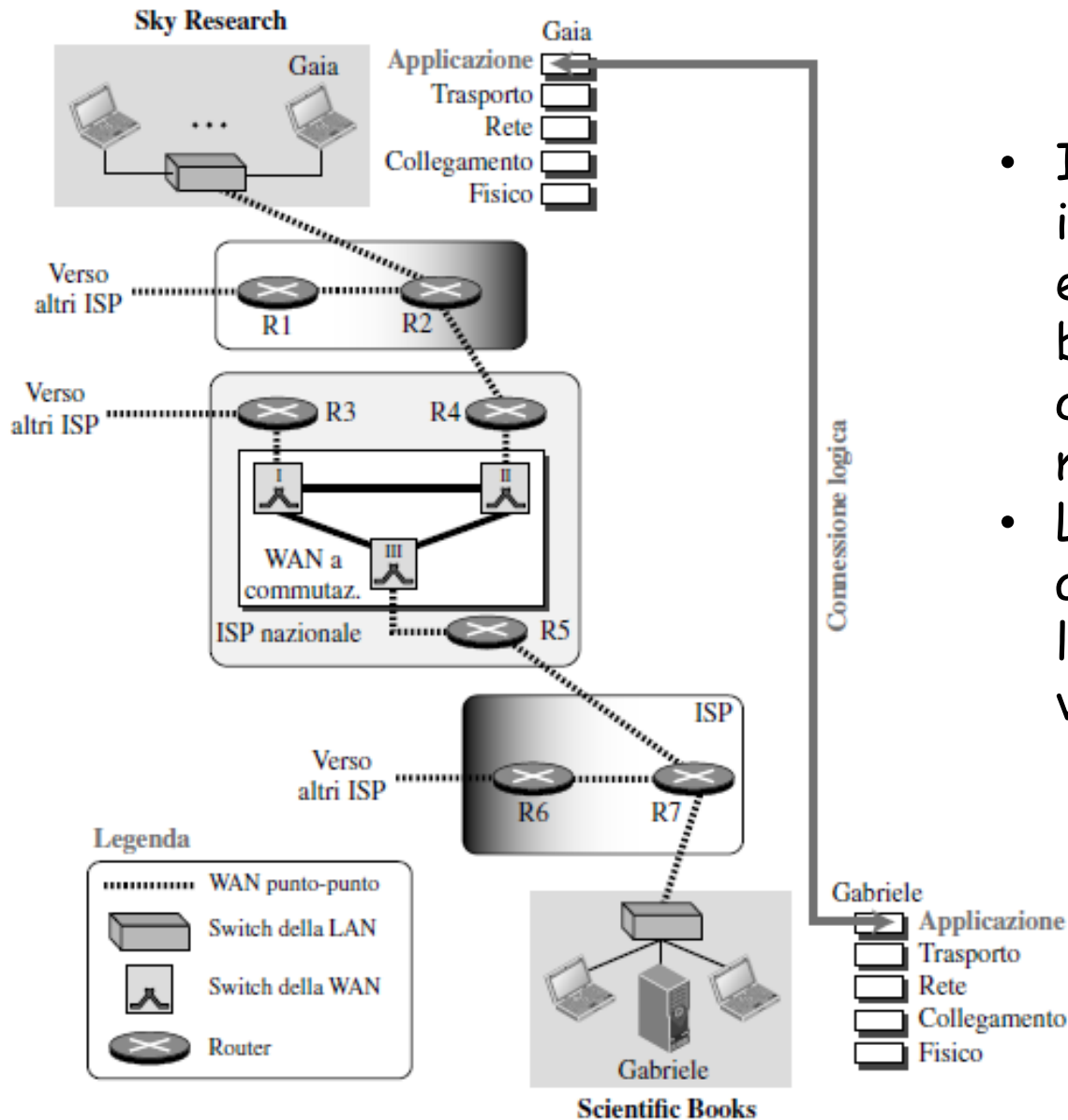
Gaia Maselli

maselli@di.uniroma1.it

Parte di queste slide sono state prese dal materiale associato ai libri:

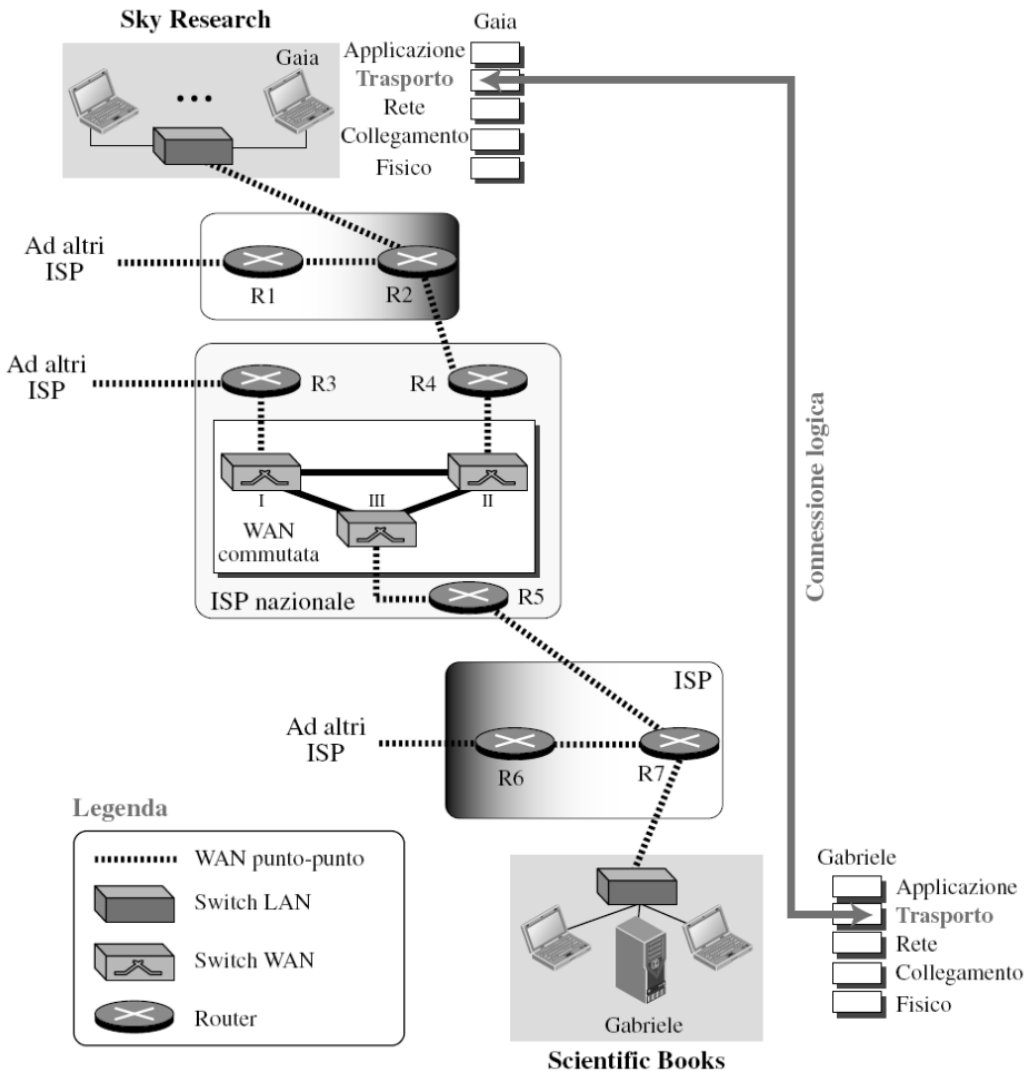
- 1) B.A. Forouzan, F. Mosharraf – Reti di calcolatori. Un approccio top-down. Copyright © 2013 McGraw-Hill Education Italy srl. Edizione italiana delle slide a cura di Gabriele D'Angelo e Gaia Maselli
- 2) Computer Networking: A Top Down Approach , 6th edition. All material copyright 1996-2009 J.F Kurose and K.W. Ross, All Rights Reserved

Comunicazione a livello applicazione



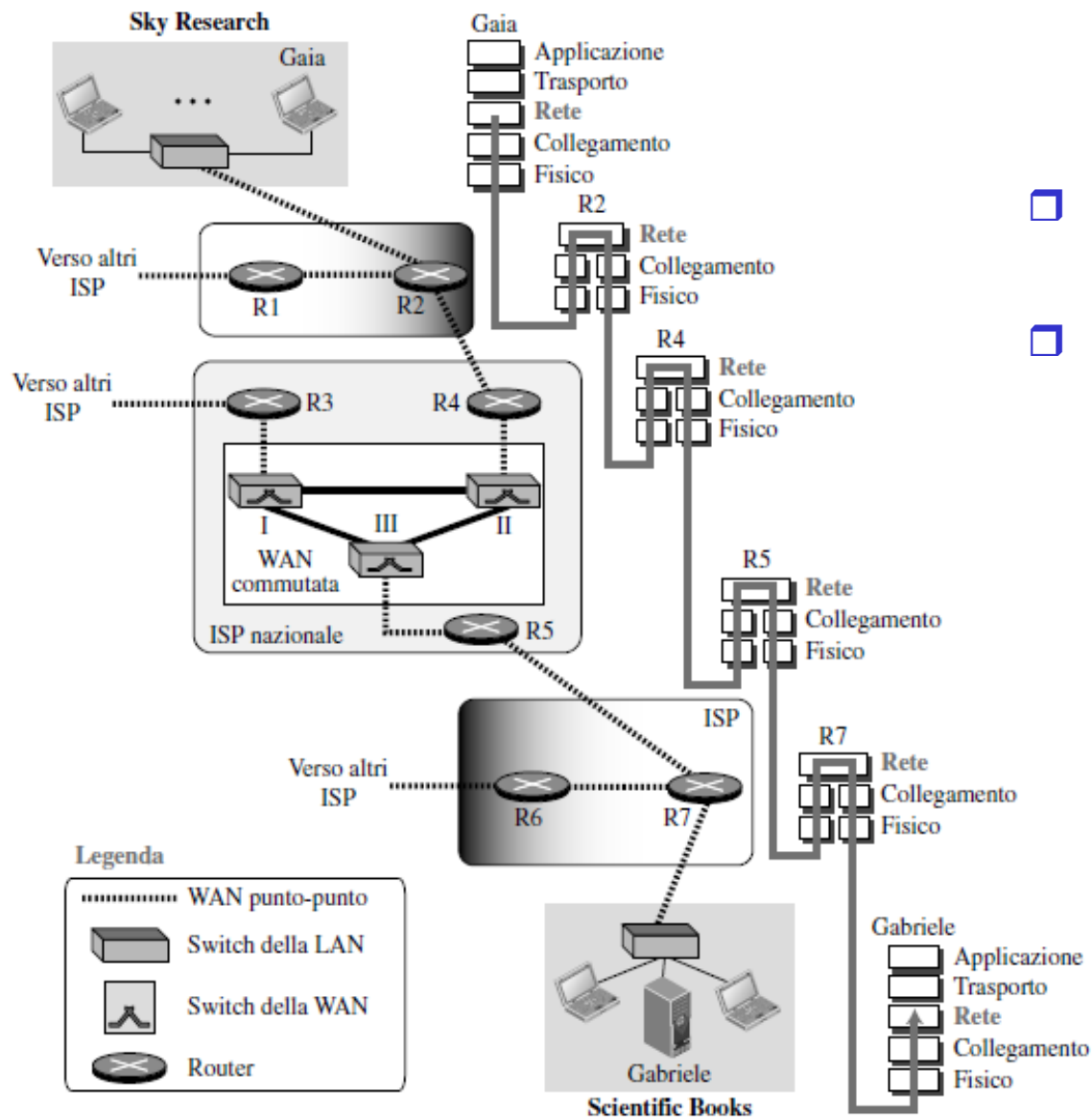
- I due **utenti** possono immaginare che tra di essi esista un canale logico bidirezionale attraverso il quale si possono inviare messaggi
- La comunicazione reale avviene attraverso più livelli e più dispositivi, e vari canali fisici

Comunicazione a livello trasporto



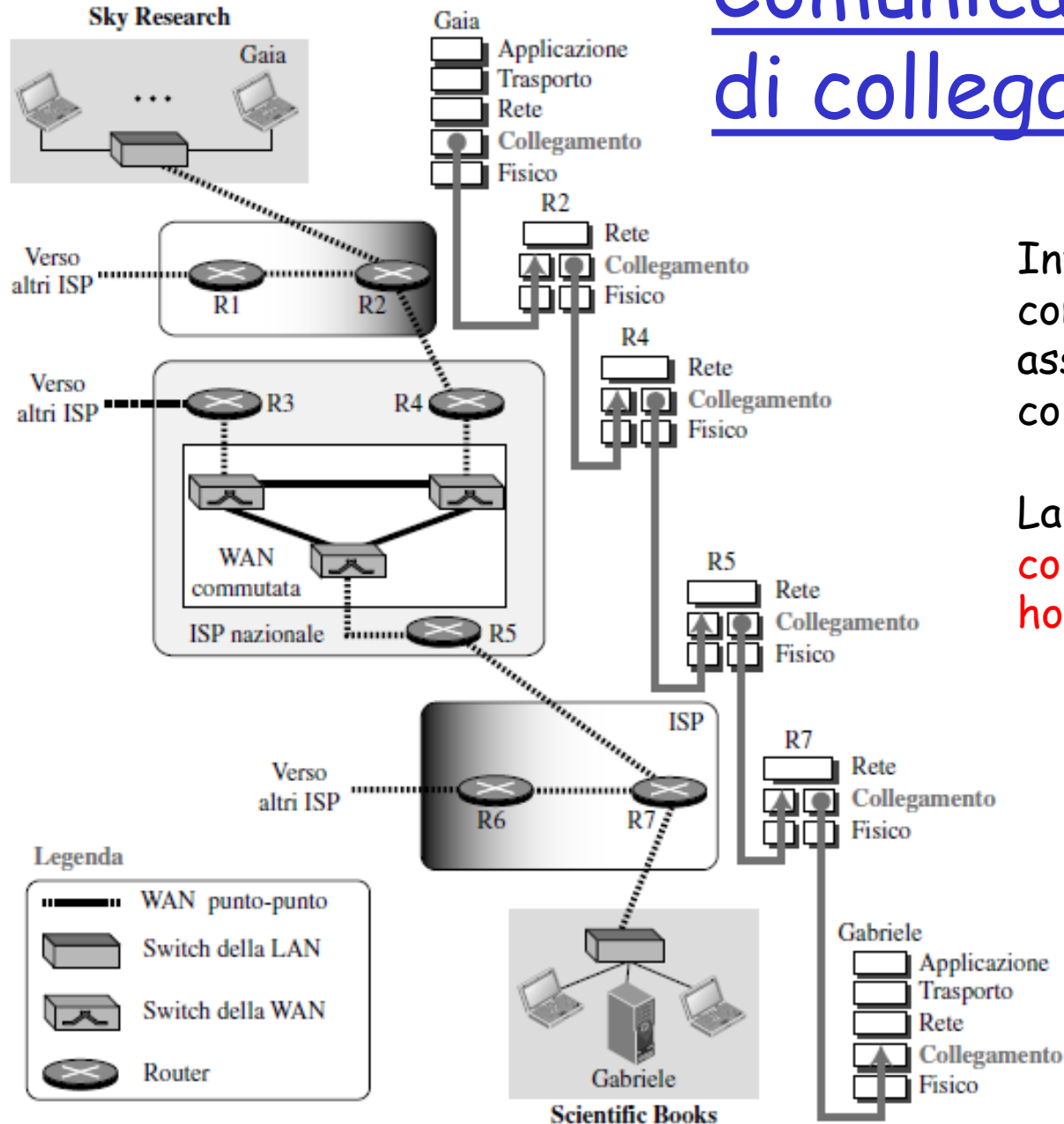
- Protocolli di trasporto forniscono la **comunicazione logica tra processi** applicativi di host differenti
- Comunicazione logica: gli host eseguono i processi come se fossero direttamente connessi (in realtà possono trovarsi agli antipodi del pianeta)

Comunicazione a livello rete



- Comunicazione **host-to-host**
- La comunicazione a livello di rete avviene tra host (end-to-end)

Comunicazione a livello di collegamento



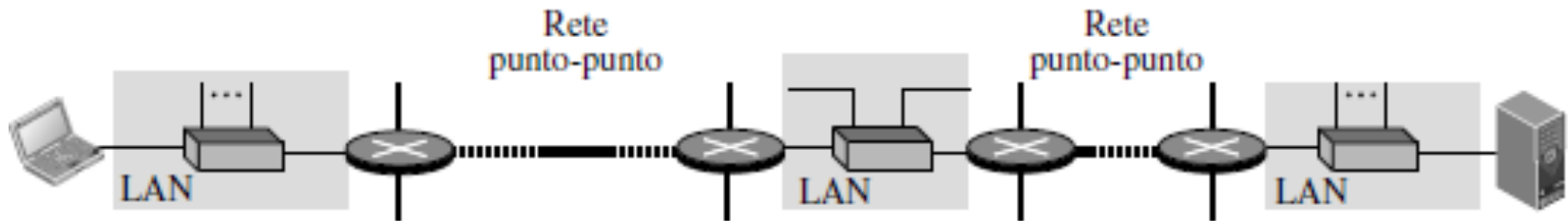
Internet non è altro che una combinazione di reti unite assieme da dispositivi di collegamento (router e switch).

La comunicazione a livello di **collegamento** è invece **hop-to-hop** o **nodo-to-nodo**

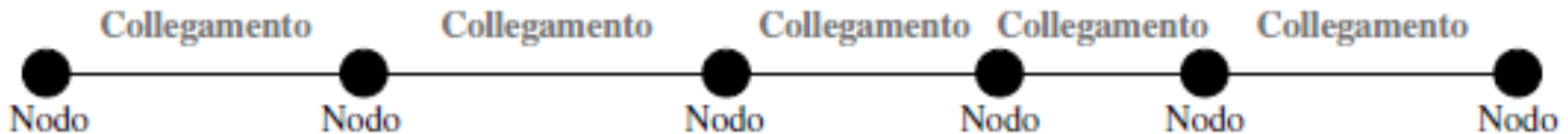
Terminologia

Alcuni termini utili:

- ❑ host e router sono i **nodi** o le **stazioni**
- ❑ i canali di comunicazione che collegano nodi adiacenti lungo un cammino sono i **collegamenti (link)**
 - collegamenti cablati
 - collegamenti wireless
 - LAN
- ❑ Le unità di dati scambiate dai protocolli a livello di link sono chiamate **frame**.



a. Una piccola parte di Internet



b. Nodi e collegamenti

I protocolli a livello di collegamento si occupano del trasporto di datagrammi lungo un singolo canale di comunicazione.

Collegamenti o Link

- ❑ I nodi all'interno di una rete sono fisicamente collegati da un mezzo trasmissivo come un cavo o l'aria
- ❑ E' possibile utilizzare
 - ❑ l'intera capacità del mezzo → **collegamento punto-punto**: dedicato a due soli dispositivi
 - ❑ solo una parte del mezzo → **collegamento broadcast**: il collegamento è condiviso tra varie coppie di dispositivi
- ❑ Un datagramma può essere gestito da diversi protocolli su collegamenti differenti:
 - Es., un datagramma può essere gestito da Ethernet sul primo collegamento, da PPP sull'ultimo e da un protocollo WAN nel collegamento intermedio.
- ❑ Anche i servizi erogati dai protocolli del livello di link possono essere differenti:
 - Ad esempio, non tutti i protocolli forniscono un servizio di consegna affidabile.

Servizi offerti dal livello di collegamento

□ Framing:

- I protocolli incapsulano i datagrammi del livello di rete all'interno di un frame a livello di link, al fine di separare i vari messaggi durante la trasmissione da una sorgente a una destinazione
- Per identificare origine e destinatario vengono utilizzati indirizzi "MAC"
 - Diversi rispetto agli indirizzi IP!

□ Consegna affidabile:

- Basata su ACK come nel trasporto
- È considerata non necessaria nei collegamenti che presentano un basso numero di errori sui bit (fibra ottica, cavo coassiale e doppino intrecciato)
- È spesso utilizzata nei collegamenti soggetti a elevati tassi di errori (es.: collegamenti wireless)

Servizi offerti dal livello di collegamento

❑ **Controllo di flusso:**

- Evita che il nodo trasmittente saturi quello ricevente.

❑ **Rilevazione degli errori:**

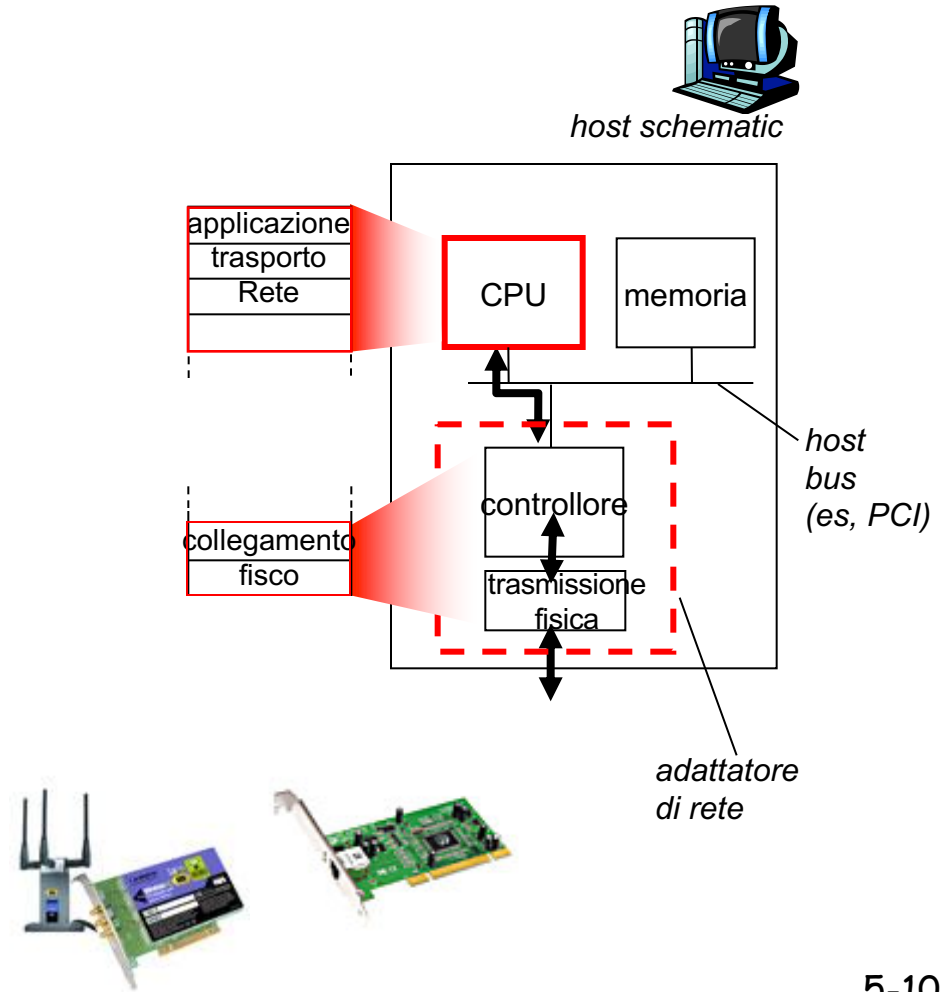
- Gli errori sono causati dalle *interferenze* (attenuazione del segnale e rumore elettromagnetico).
- Il nodo ricevente individua la presenza di errori
 - è possibile grazie all'inserimento, da parte del nodo trasmittente, di bit di controllo di errore all'interno del frame.

❑ **Correzione degli errori:**

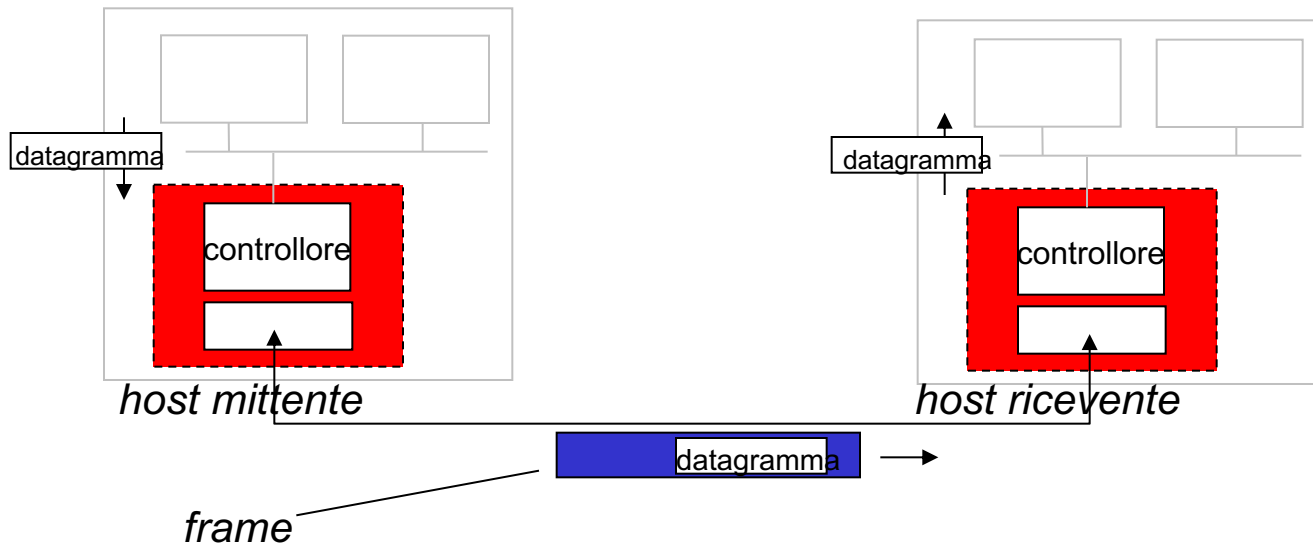
- Il nodo ricevente determina anche il punto in cui si è verificato l'errore, e lo corregge.

Dove è implementato il livello di collegamento?

- In tutti gli host
- È realizzato in un adattatore (NIC, *network interface card*)
 - scheda Ethernet, PCMCIA, 802.11
 - Implementa il livello di collegamento e fisico
- è una combinazione di hardware, software e firmware



Adattatori



□ Lato mittente:

- Incapsula un datagramma in un frame.
- Imposta il bit rilevazione degli errori, trasferimento dati affidabile, controllo di flusso, etc.

□ Lato ricevente:

- Individua gli errori, trasferimento dati affidabile, controllo di flusso, etc.
- Estrae i datagrammi e li passa al nodo ricevente

Due sottolivelli

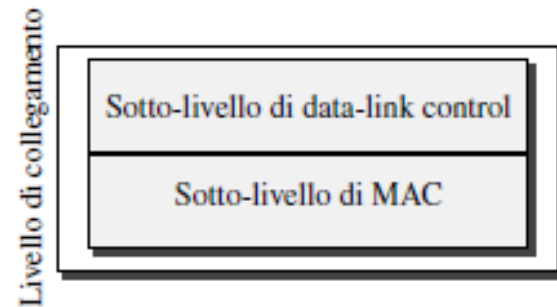
- **Data-Link Control (DLC)** si occupa di tutte le questioni *comuni* sia ai collegamenti punto-punto che a quelli broadcast

- Framing
- Controllo del flusso e degli errori
- Rilevamento e correzione degli errori

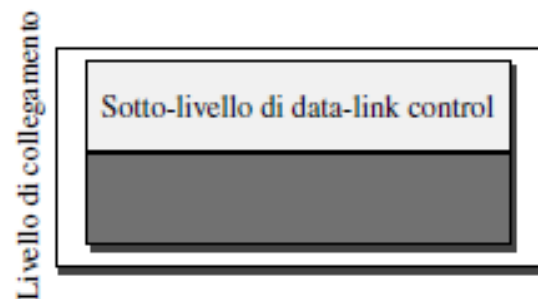
si occupa delle procedure per la comunicazione tra due nodi adiacenti (comunicazione nodo-a-nodo), indipendentemente dal fatto che il collegamento sia dedicato o broadcast

- **Media Access Control (MAC)** si occupa solo degli aspetti *specifici* dei canali broadcast

- Controllo dell'accesso al mezzo condiviso



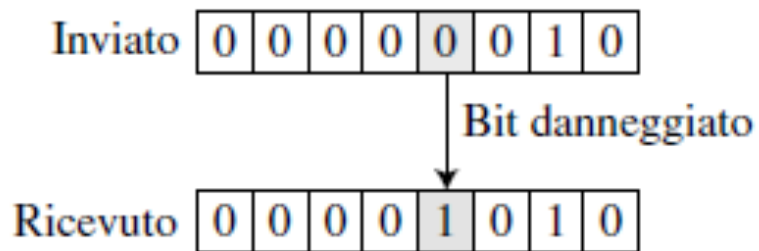
a. Livello di collegamento



b. Livello di collegamento di un collegamento punto-punto

Errori su singolo bit o a burst

Gli errori sono dovuti a interferenze che possono cambiare la forma del segnale

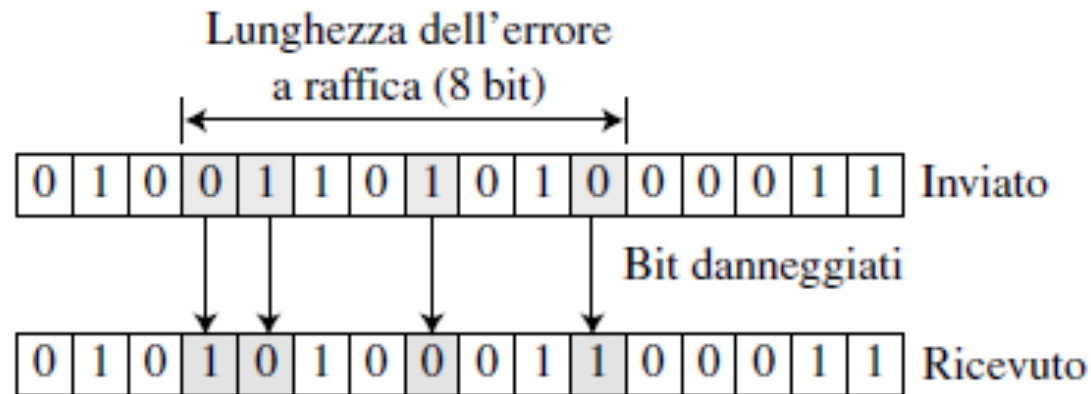


a. Errore su un singolo bit

Il numero di bit coinvolti dipende dalla velocità di trasferimento dati e dalla durata del rumore.

ES. 1 Kbps con un rumore di 1/100 sec può influire su 10 bit

La probabilità che avvenga un errore di tipo burst (a raffica) è più elevata rispetto a quella di un errore sul singolo bit, in quanto la durata dell'interferenza (detta anche rumore) normalmente è più lunga rispetto a quella di un solo bit



b. Errore a raffica

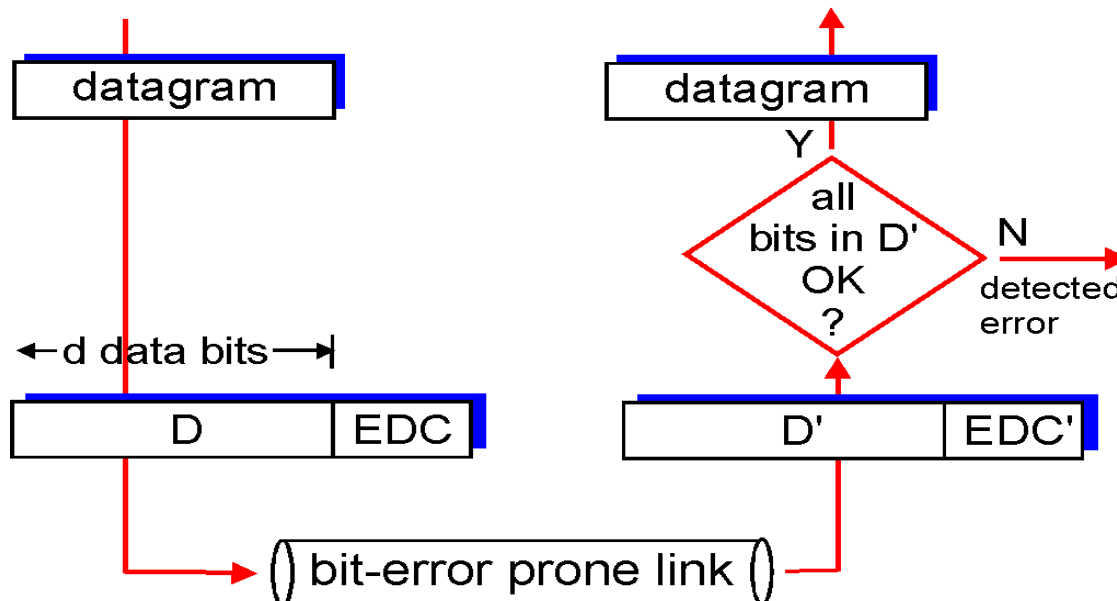
Tecniche di rilevazione degli errori

EDC= *Error Detection and Correction*

D = Dati che devono essere protetti da errori e ai quali vengono aggiunti dei bit EDC.

La rilevazione degli errori non è attendibile al 100%!

- è possibile che ci siano errori non rilevati
- per ridurre la probabilità di questo evento, le tecniche più sofisticate prevedono un'elevata **ridondanza**

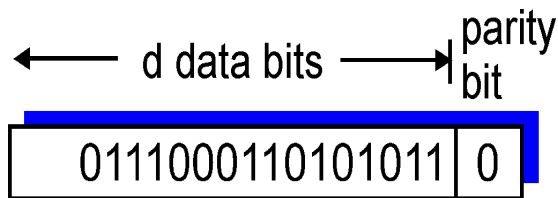


Controllo di parità

Il bit aggiuntivo (di parità) viene selezionato in modo da rendere pari il numero totale di 1 all'interno della codeword

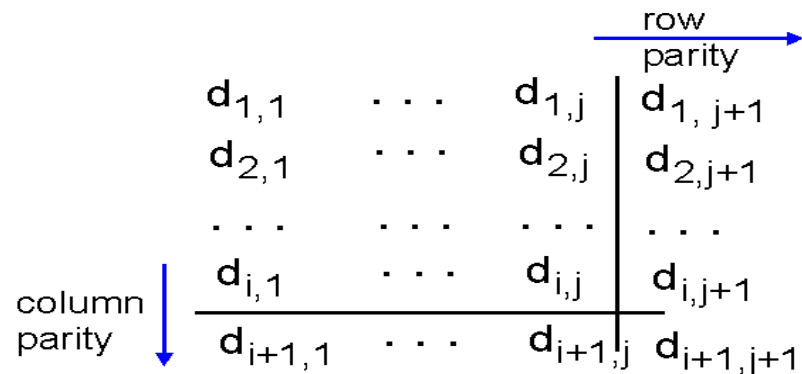
Unico bit di parità:

Si è verificato almeno un errore in un bit



Parità bidimensionale:

Individua e *corregge* il bit alterato



1	0	1	0	1	1
1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0

no errors

1	0	1	0	1	1
1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0

parity error

*correctable
single bit error*

Protocolli di accesso multiplo

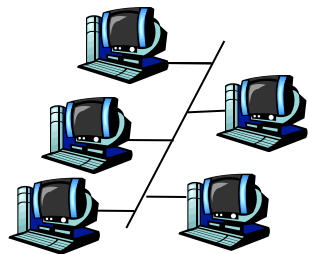
Esistono due tipi di collegamenti di rete:

□ Collegamento punto-punto

- Impiegato per connessioni telefoniche.
- Collegamenti punto-punto tra Ethernet e host.
- Viene utilizzato il Point-to-Point protocol (PPP) del DLC

□ Collegamento broadcast (cavo o canale condiviso)

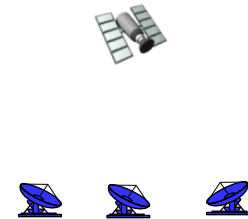
- Ethernet tradizionale
- Wireless LAN 802.11
- Necessità di un protocollo (MAC) per la gestione del canale condiviso



canale cablato
condiviso



RF condivisa
(es. 802.11 WiFi)



RF condivisa
(satellite)

Problema dell'accesso multiplo



(rumore, aria condivisi)

Protocolli di accesso multiplo

- ❑ Connessione a un canale broadcast condiviso.
- ❑ Centinaia o anche migliaia di nodi possono comunicare direttamente su un canale broadcast:
 - Si genera una *collisione* quando i nodi ricevono due o più frame contemporaneamente.

Protocolli di accesso multiplo

- ❑ Scopo: evitare caos e realizzare una condivisione
- ❑ Protocolli che fissano le modalità con cui i nodi regolano le loro trasmissioni sul canale condiviso.
- ❑ La comunicazione relativa al canale condiviso deve utilizzare lo stesso canale!
 - non c'è un canale "out-of-band" per la coordinazione

Protocolli di accesso multiplo ideali

Canale broadcast con velocità di R bit al sec:

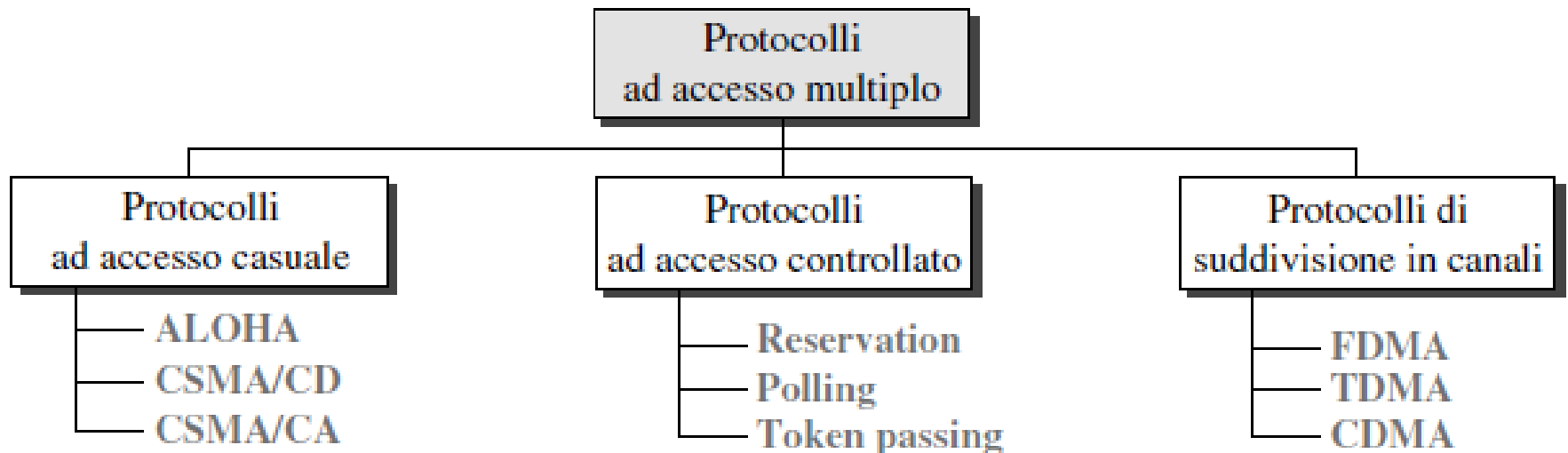
1. Quando un nodo deve inviare dati, questo dispone di un tasso trasmissivo pari a R bps.
2. Quando M nodi devono inviare dati, questi dispongono di un tasso trasmissivo pari a R/M bps.
3. Il protocollo è decentralizzato:
 - non ci sono nodi master
 - non c'è sincronizzazione dei clock

Protocolli di accesso multiplo

Si possono classificare in una di queste tre categorie:

- ❑ **Protocolli a suddivisione del canale** (*channel partitioning*)
 - Suddivide un canale in "parti più piccole" (slot di tempo, frequenza, codice)
 - Li alloca presso un nodo per utilizzo esclusivo
 - No collisioni!
- ❑ **Protocolli ad accesso casuale** (*random access*)
 - I canali non vengono divisi e si può verificare una collisione.
 - I nodi coinvolti ritrasmettono ripetutamente i pacchetti.
- ❑ **Protocolli a rotazione** ("*taking-turn*")
 - Ciascun nodo ha il suo turno di trasmissione, ma i nodi che hanno molto da trasmettere possono avere turni più lunghi.

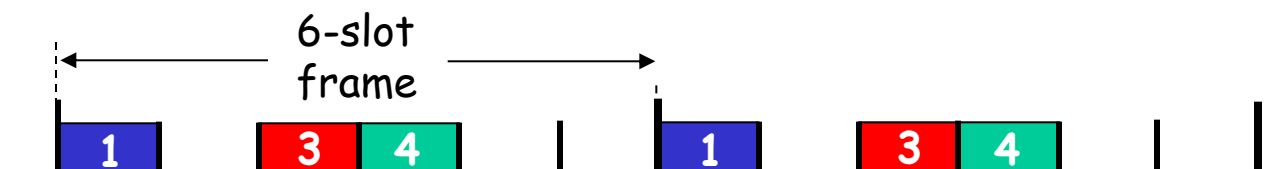
Classificazione dei protocolli MAC



Protocolli a suddivisione del canale: TDMA

TDMA: accesso multiplo a divisione di tempo.

- ❑ Turni per accedere al canale
- ❑ Suddivide il canale condiviso in *intervalli di tempo*.
- ❑ Gli slot non usati rimangono inattivi
- ❑ Esempio: gli slot 1, 3 e 4 hanno un pacchetto, 2, 5 e 6 sono inattivi.

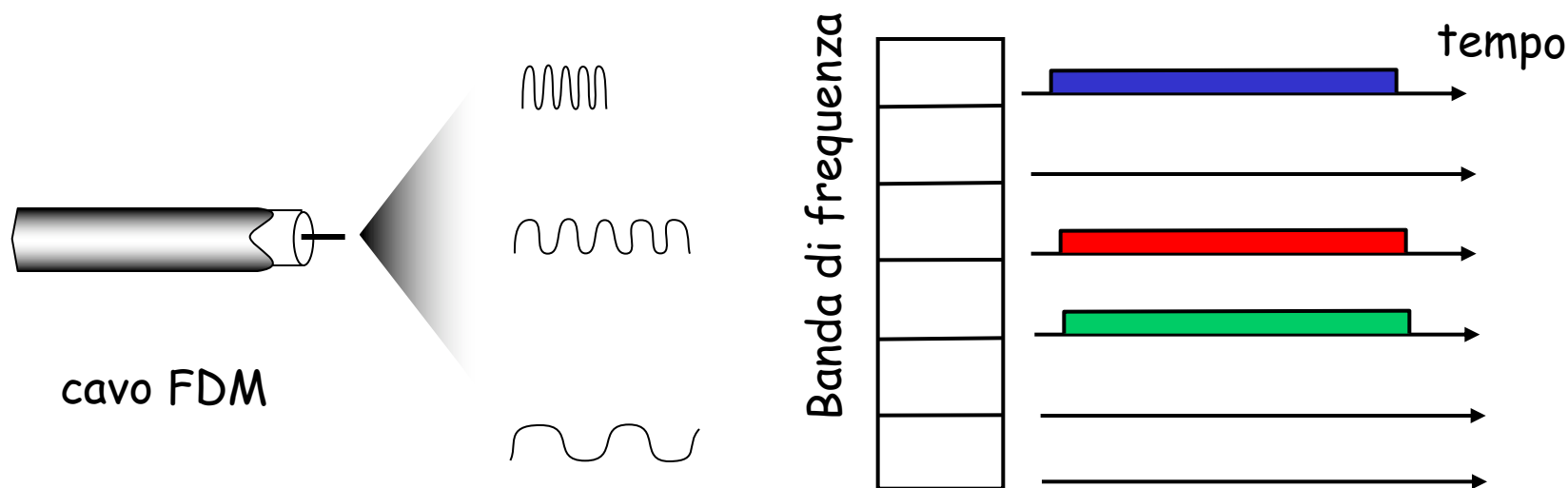


- ❑ Tasso trasmissivo R/N bps

Protocolli a suddivisione del canale: FDMA

FDMA: accesso multiplo a divisione di frequenza.

- ❑ Suddivide il canale in bande di frequenza.
- ❑ A ciascuna stazione è assegnata una banda di frequenza prefissata.
- ❑ Esempio: le bande 1, 3 e 4 hanno un pacchetto, 2, 5 e 6 sono inattive.



Protocolli ad accesso casuale

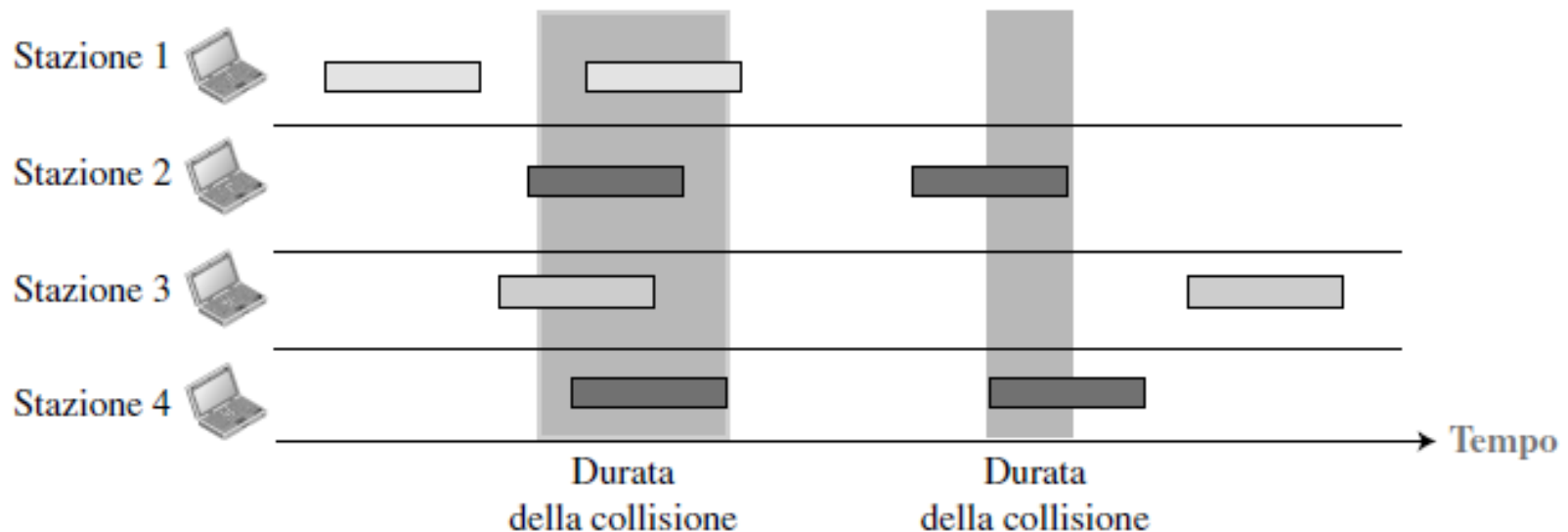
- Nessuna stazione ha il controllo sulle altre
- Ogni volta che una stazione ha dei dati da inviare usa una procedura definita dal protocollo per decidere se spedire o meno
- **ACCESSO CASUALE**
 - Non c'è un tempo programmato nel quale la stazione deve trasmettere
 - Nessuna regola specifica quale sarà la prossima stazione a trasmettere
- Le stazioni competono l'una con l'altra per accedere al mezzo trasmissivo (*contesa del canale*)
- Due o più nodi trasmittenti → "collisione"
- **Il protocollo ad accesso casuale** definisce:
 - Come rilevare un'eventuale collisione
 - Come ritrasmettere se si è verificata una collisione
- Esempi di protocolli ad accesso casuale: ALOHA, slotted ALOHA, CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA

ALOHA

- ❑ E' il primo metodo di accesso casuale che è stato proposto in letteratura
- ❑ Sviluppato all'Università delle Hawaii nei primi anni 70
- ❑ Ideato per mettere in comunicazione gli atolli mediante una LAN radio (wireless) ma può essere utilizzato su qualsiasi mezzo condiviso
- ❑ Essendo un protocollo ad accesso casuale possono verificarsi collisioni

ALOHA puro

- Ogni stazione può inviare un frame tutte le volte che ha dati da inviare
- Il ricevente invia un **ACK** per notificare la corretta ricezione del frame
- Se il mittente non riceve **ACK** entro un **timeout** deve ritrasmettere
- Se due stazioni ritrasmettono contemporaneamente di nuovo collisione, allora si attende un tempo random (**back-off**) prima di effettuare la ritrasmissione
- La casualità del backoff aiuta ad evitare altre collisioni
- Dopo un numero massimo di tentativi K_{max} , una stazione interrompe i suoi tentativi e prova più tardi



Durata della collisione variabile, anche di un solo bit!

Timeout e backoff

Timeout

- ❑ Per quanto tempo si aspetta l'ack?
- ❑ Il periodo di timeout equivale al massimo ritardo di propagazione di round-trip (andata del frame e ritorno dell'ack) tra le due stazioni più lontane ($2 \times T_p$)

Back-off esponenziale binario

- ❑ Quanto si aspetta prima di ritrasmettere?
- ❑ Il tempo di back-off T_B è un valore scelto casualmente che dipende dal numero K di trasmissioni fallite

Backoff time = $R \times T_{fr}$ dove $R \in [0, 2^{K-1}]$

K = # tentativi

T_{fr} = tempo x inviare un frame

$K_{max} = 15$

Esempio calcolo back-off

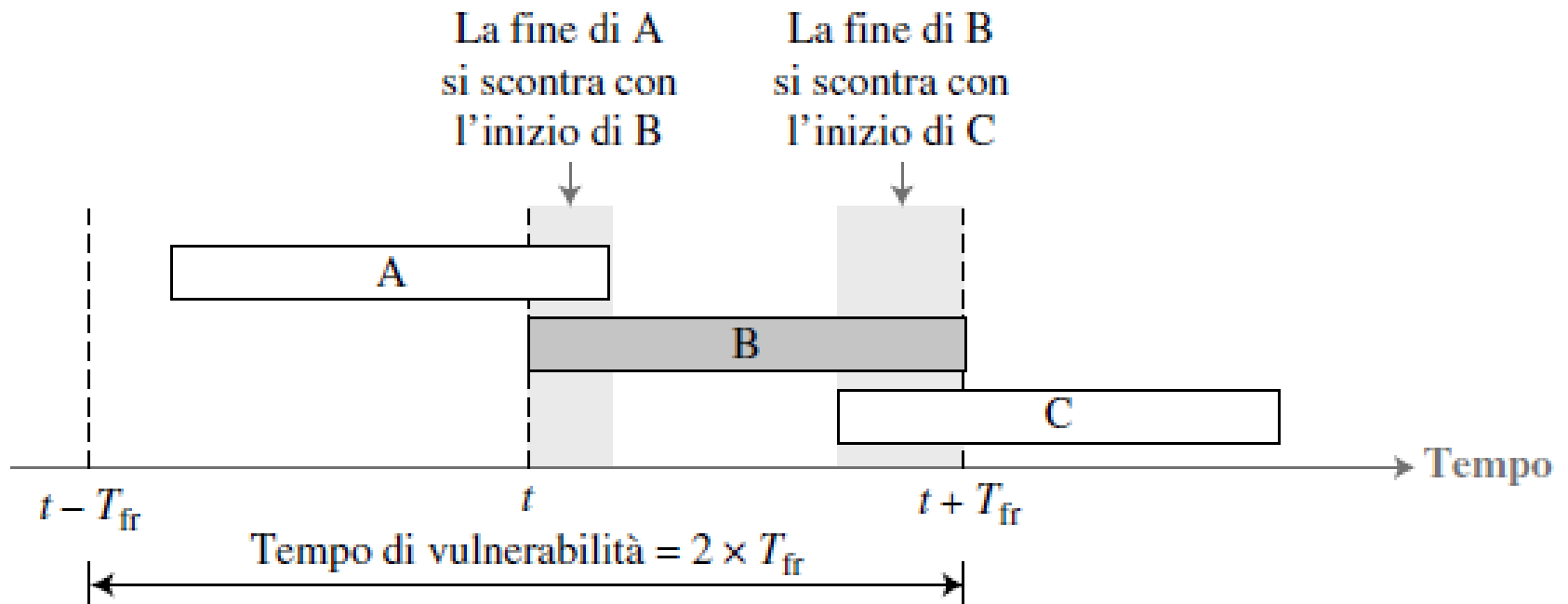
- Le stazioni in una rete wireless ALOHA sono a una distanza massima di 600 km. Supponendo che i segnali si propaghino a 3×10^8 m/s, troviamo:

$$T_p = (600 \times 10^3) / (3 \times 10^8) = 2 \text{ ms.}$$

- Per $K = 2$ l'intervallo di R è $\{0, 1, 2, 3\}$.
- Ciò significa che $T_B = R * T_{Fr}$ può essere 0, 2, 4 o 6 ms, sulla base del risultato della variabile casuale R .

ALOHA puro

- ❑ Elevate probabilità di collisione
- ❑ **Tempo di vulnerabilità:** l'intervallo di tempo nel quale il frame è a rischio di collisioni
 - Il frame trasmesso a t si sovrappone con la trasmissione di qualsiasi altro frame inviato in $[t-1, t+1]$.
 - Tempo di vulnerabilità = $2T_{fr}$



Studio dell'efficienza

L'**efficienza** è definita come la frazione di slot vincenti in presenza di un elevato numero N di nodi attivi, che hanno sempre un elevato numero pacchetti da spedire.

Efficienza (o throughput)

- Assumiamo tutti i frame hanno la stessa dimensione e ogni nodo ha sempre un frame da trasmettere
- In ogni istante di tempo, p è la probabilità che un nodo trasmetta un frame, $(1-p)$ che non trasmetta
- Supponendo che un nodo inizi a trasmettere al tempo t_0
- Perché la trasmissione vada a buon fine, nessun altro nodo deve aver iniziato una trasmissione nel tempo $[t_0-1, t_0]$. Tale probabilità è data da $(1-p)^{N-1}$
- Allo stesso modo nessun nodo deve iniziare a trasmettere nel tempo $[t_0, t_0+1]$, e la probabilità di questo evento è ancora $(1-p)^{N-1}$
- La probabilità che un nodo trasmetta con successo è dunque $p(1-p)^{2(N-1)}$
- studiando il valore di p che massimizza la probabilità di successo per N che tende a infinito si ottiene che l'efficienza massima è $1/2e$ ovvero 0,18 → molto bassa!!!

Efficienza

$P(\text{trasmissione con successo di un dato nodo}) =$

$P(\text{il nodo trasmette})^*$

$P(\text{nessun altro nodo trasmette in } [t_0-1, t_0]^*)$

$P(\text{nessun altro nodo trasmette in } [t_0, t_0+1])$

$$= p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1}$$

$$= p \cdot (1-p)^{2(N-1)}$$

... scegliendo p migliore e $n \rightarrow$ infinito ...

$$= 1/(2e) = 0,18$$

Il throughput è $0,18R$ bps

Slotted ALOHA

- Un modo per aumentare l'efficienza di Aloha (Roberts, 1972) consiste nel **dividere il tempo in intervalli discreti**, ciascuno corrispondente ad un frame time (T_{fr})
- **Sincronizzazione**: i nodi devono essere d'accordo nel confine fra gli intervalli, e ciò può essere fatto facendo emettere da una attrezzatura speciale un breve segnale all'inizio di ogni intervallo

Slotted ALOHA

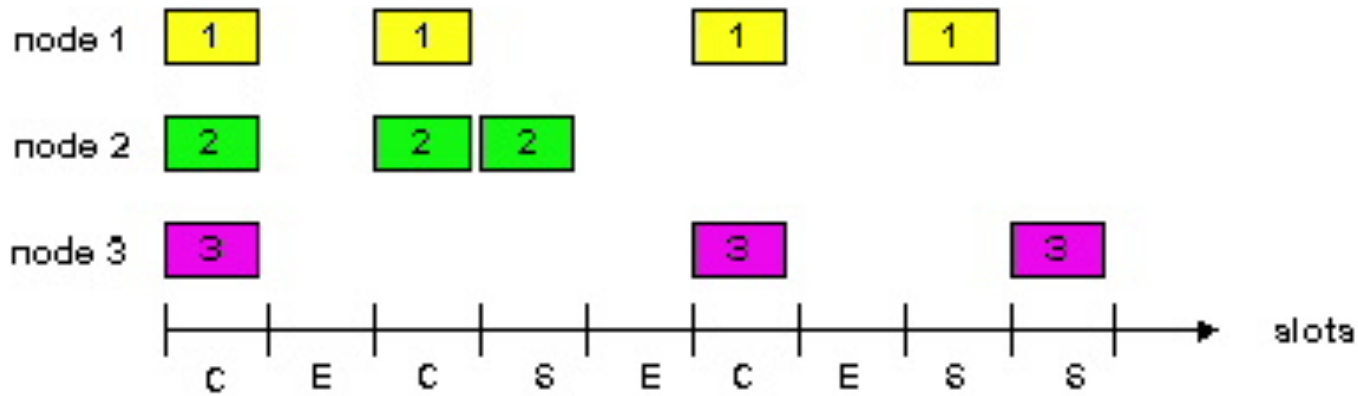
Assumiamo che:

- ❑ Tutti i pacchetti hanno la stessa dimensione.
- ❑ Il tempo è suddiviso in slot; ogni slot equivale al tempo di trasmissione di un pacchetto.
- ❑ I nodi iniziano la trasmissione dei pacchetti solo all'inizio degli slot.
- ❑ I nodi sono sincronizzati.
- ❑ Se in uno slot due o più pacchetti collidono, i nodi coinvolti rilevano l'evento prima del termine dello slot.

Operazioni:

- ❑ Quando a un nodo arriva un nuovo pacchetto da spedire, il nodo attende l'inizio del prossimo slot.
 - ❑ **Se non si verifica una collisione:** il nodo può trasmettere un nuovo pacchetto nello slot successivo.
 - ❑ **Se si verifica una collisione:** il nodo ritrasmette con **probabilità p** il suo pacchetto durante gli slot successivi.

Slotted ALOHA



Pro

- Consente a un singolo nodo di trasmettere continuamente pacchetti alla massima velocità del canale.
- Il tempo di vulnerabilità si riduce a un solo slot (T_{fr})

Contro

- Una certa frazione degli slot presenterà collisioni e di conseguenza andrà "sprecata".
- Un'alta frazione degli slot rimane vuota, quindi inattiva.

L'efficienza di Slotted Aloha

- Supponiamo N nodi con pacchetti da spedire, ognuno trasmette i pacchetti in uno slot con probabilità p .
- La probabilità di successo di un dato nodo = $p(1-p)^{N-1}$
- Poiché ci sono N nodi, la probabilità che ogni nodo abbia successo
= $Np(1-p)^{N-1}$
- L'efficienza che si ottiene: per un elevato numero di nodi, ricaviamo il limite di $Np^*(1-p^*)^{N-1}$ per N che tende all'infinito, e otterremo $1/e = 0,37$
- Il throughput non è R ma $0.37R$ bps!

Nel caso migliore:
solo il 37% degli slot
compie lavoro utile.



Accesso multiplo a rilevazione della portante (CSMA)

CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

- ❑ si pone in ascolto prima di trasmettere (*listen before talk, o sense before transmit*)
- ❑ Se rileva che il canale è libero, trasmette l'intero pacchetto.
- ❑ Se il canale sta già trasmettendo, il nodo aspetta un altro intervallo di tempo.

- ❑ Analogia: se qualcun altro sta parlando, aspettate finché abbia concluso!

Può avvenire una collisione?

CSMA con trasmissioni in collisione

Le collisioni *possono* ancora verificarsi:

Il ritardo di propagazione fa sì che due nodi non rilevino la reciproca trasmissione

Tempo di vulnerabilità:
Tempo di propagazione

nota:

La distanza e il ritardo di propagazione giocano un ruolo importante nel determinare la probabilità di collisione.

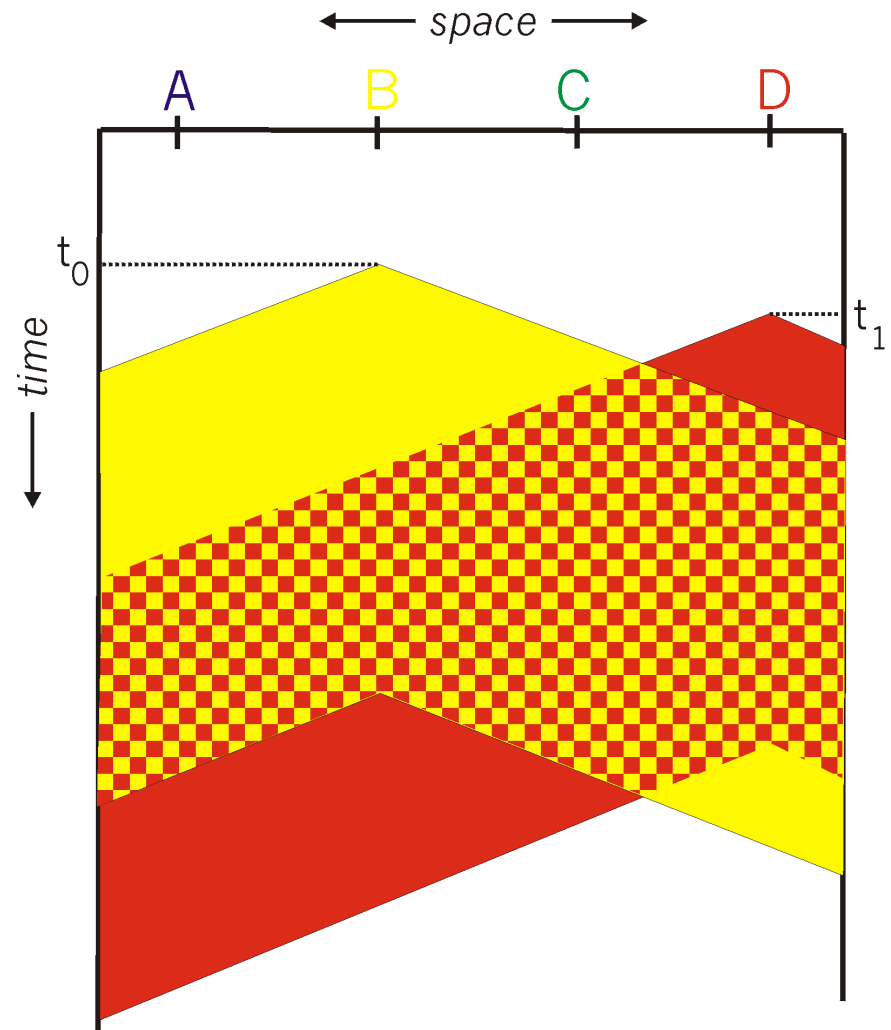


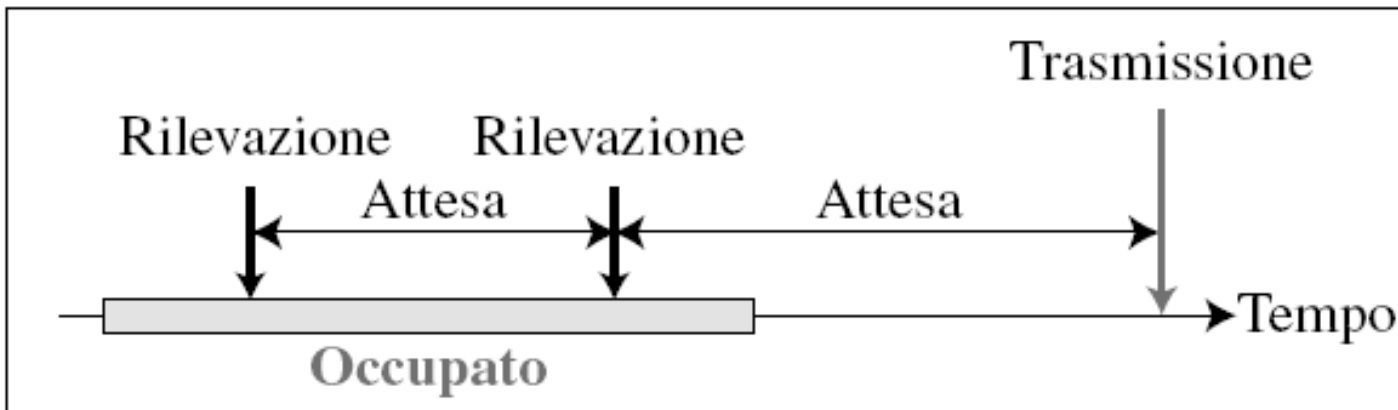
Diagramma spazio tempo

Metodi di persistenza

- Cosa fa un nodo se trova il canale libero?
 - Trasmette subito
 - Non persistente
 - 1-persistente
 - Trasmette con probabilità p
 - p -persistente
- Cosa fa un nodo se trova il canale occupato?
 - Desiste: riascolta dopo un tempo random
 - Non persistente
 - Persiste: rimane in ascolto finchè il canale non si è liberato
 - 1-persistente
 - p -persistente (usato in presenza di time slot)

Non persistente

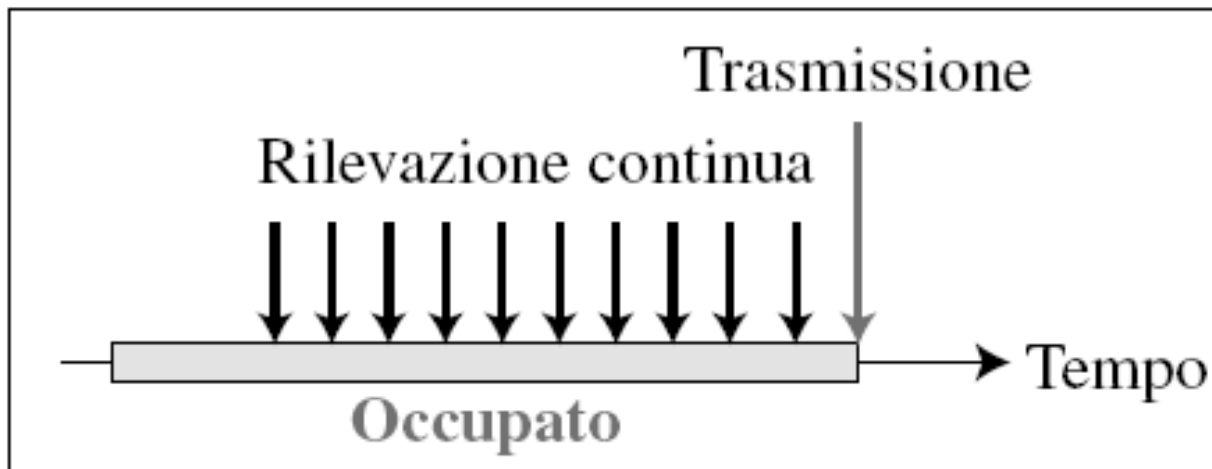
- ❑ Se il canale è libero trasmette immediatamente
- ❑ Se il canale è occupato attende un tempo random e poi riascolta il canale (carrier sense a intervalli)
- ❑ Se collisione back-off



b. Non persistente

1 persistente

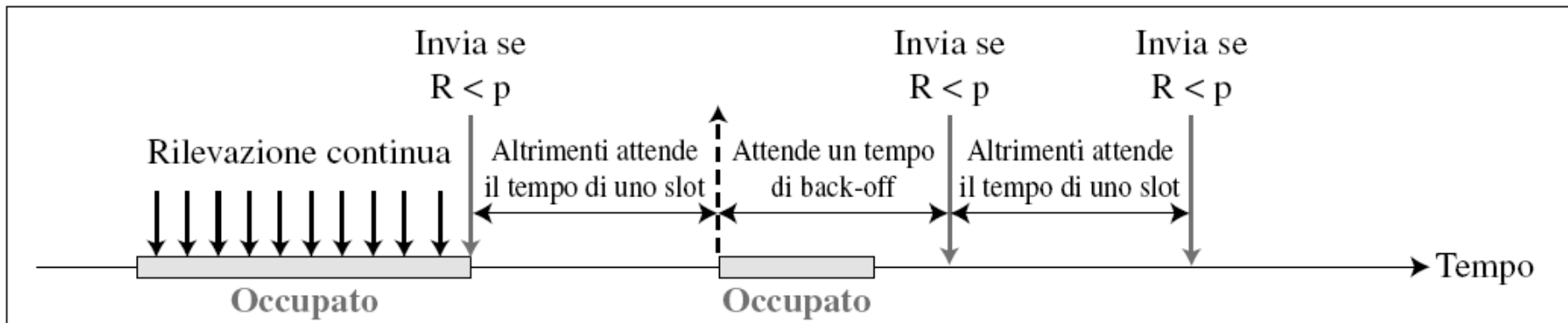
- ❑ Se il canale è libero trasmette immediatamente ($p=1$)
- ❑ Se il canale è occupato continua ad ascoltare (carrier sense continuo)
- ❑ Se collisione backoff



a. 1 persistente

p persistente

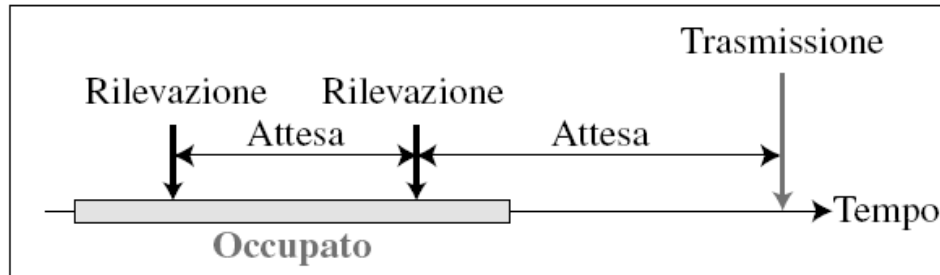
- ❑ Se il canale è libero
 - Trasmette con probabilità p
 - Aspetta l'inizio del prossimo slot con probabilità $(1-p)$
- ❑ Se il canale è occupato usa la procedura di back-off (attesa di un tempo random e nuovo ascolto del canale)
- ❑ Se collisione back-off



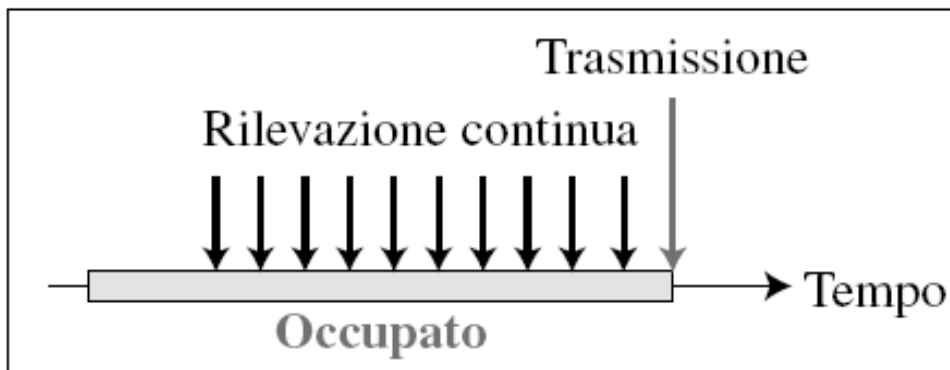
c. p persistente

Persistenza

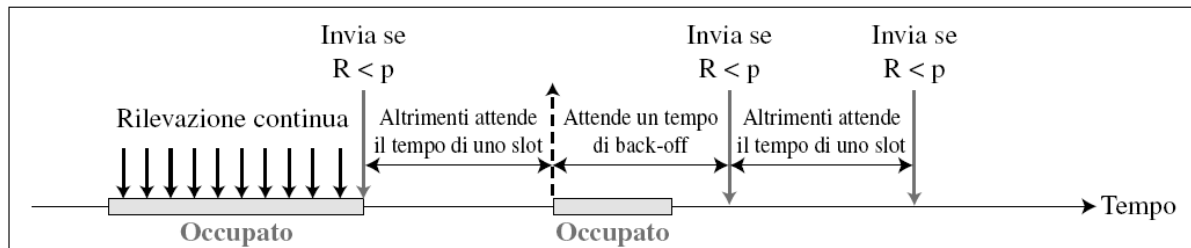
A cosa si riferisce?



b. Non persistente



a. 1 persistente



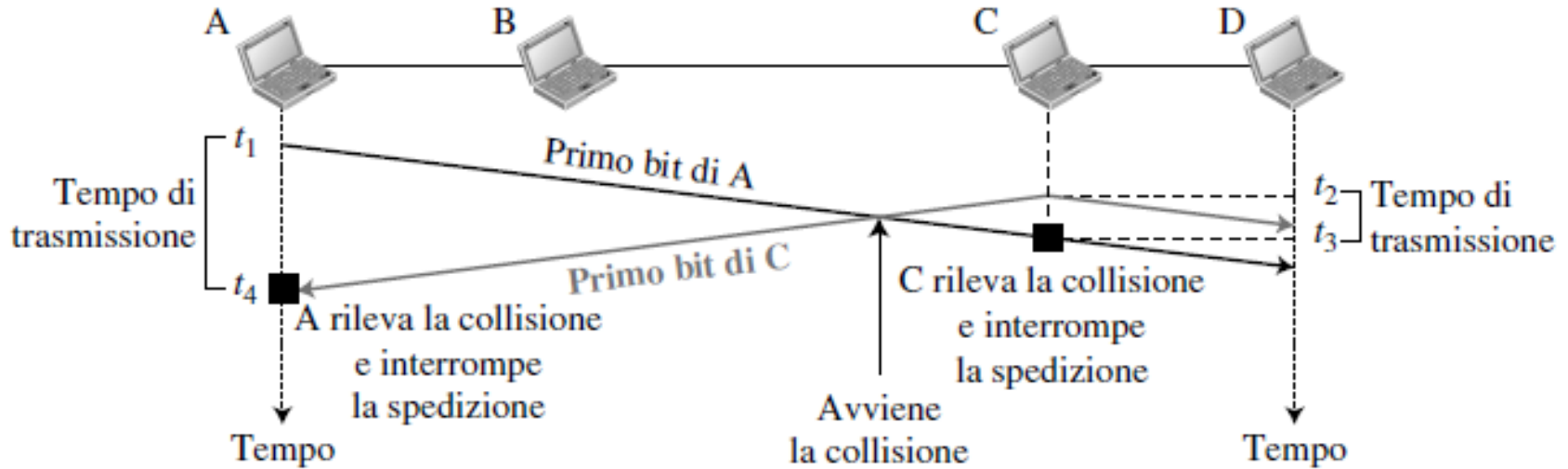
c. p persistente

CSMA/CD (rilevazione di collisione)

CSMA/CD (collision detection): ascolta il canale anche durante la trasmissione

- Rileva la collisione in poco tempo.
 - Annulla la trasmissione non appena si accorge che c'è un'altra trasmissione in corso.
- Rilevazione della collisione:
- facile nelle LAN cablate.
 - difficile nelle LAN wireless.
- Analogia: un interlocutore educato, se qualcun altro ha iniziato a parlare si interrompe

CSMA/CD (rilevazione di collisione)



- ❑ A ascolta il canale e inizia la trasmissione al tempo t_1
- ❑ C al tempo t_2 ascolta il canale (non rileva ancora il primo bit di A) e quindi inizia a trasmettere
- ❑ Al tempo t_3 C riceve il primo bit di A e interrompe la trasmissione perchè c'è collisione
- ❑ Al tempo t_4 A riceve il primo bit di C e interrompe la trasmissione perchè c'è collisione

Dimensione minima del frame

- ❑ Cosa succederebbe se un mittente finisse di trasmettere un frame prima di ricevere il primo bit di un'altra stazione (che ha già iniziato a trasmettere)?
- ❑ Una stazione una volta inviato un frame non ne tiene una copia del frame, ne controlla il mezzo trasmissivo per rilevare collisioni
- ❑ Perché il Collision Detection funzioni, il mittente deve poter rilevare la trasmissione mentre sta trasmettendo ovvero prima di inviare l'ultimo bit del frame!
- ❑ Il tempo di trasmissione di un frame deve essere almeno due volte il tempo di propagazione T_p
- ❑ Quindi la prima stazione deve essere ancora in trasmissione dopo $2T_p$

Esempio

- Una rete che utilizza il CSMA/CD ha un rate 10 Mbps. Se il tempo di propagazione massimo è 25,6 μ s, qual è la dimensione minima del frame?

Soluzione

Il tempo di trasmissione minimo del frame è:

$$T_{fr} = 2 \times T_p = 51.2 \mu s.$$

Ciò significa, nel peggiore dei casi, che una stazione deve trasmettere per un periodo di 51,2 μ s per poter rilevare la collisione.

La dimensione minima del frame è quindi $10 \text{ Mbps} \times 51,2 \mu s = 512 \text{ bit}$ o 64 byte.

Questa è proprio la dimensione minima del frame nell'Ethernet Standard, come si vedrà nella prossima lezione.

Efficienza del CSMA/CD

- ❑ Quando un solo nodo trasmette, il nodo può trasmettere al massimo rate (es. 10Mbps, 100Mbps, 1 Gbps)
- ❑ Quando più nodi trasmettono, il rate effettivo o throughput è minore
- ❑ Il throughput del CSMA/CD è maggiore sia dell'ALOHA puro che dello slotted ALOHA
- ❑ Per il metodo 1 persistente (che è anche il caso dell'Ethernet tradizionale ovvero 10 Mbps) il throughput massimo è del 50%

Protocolli MAC a rotazione

Protocolli MAC a suddivisione del canale:

- Condividono il canale equamente ed efficientemente con carichi elevati.
- Inefficienti con carichi non elevati.

Protocolli MAC ad accesso casuale:

- Efficienti anche con carichi non elevati: un singolo nodo può utilizzare interamente il canale.
- Carichi elevati: eccesso di collisioni.

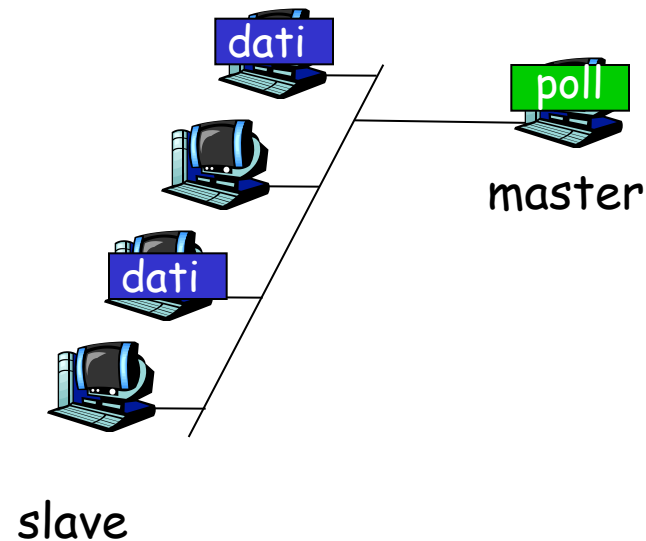
Protocolli a rotazione

- Cercano di realizzare un compromesso tra i protocolli precedenti

Protocolli a rotazione

Protocollo polling:

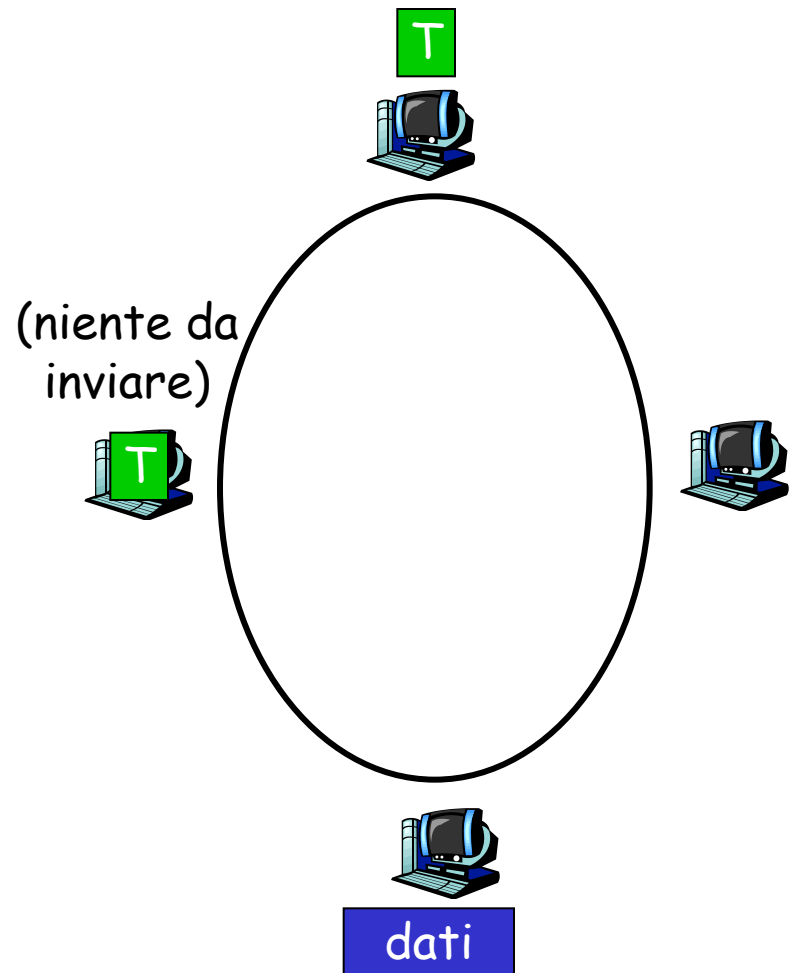
- ❑ Un nodo principale sonda "a turno" gli altri.
- ❑ In particolare:
 - elimina le collisioni
 - elimina gli slot vuoti
 - ritardo di polling
 - se il nodo principale (master) si guasta, l'intero canale resta inattivo.



Protocolli a rotazione

Protocollo token-passing:

- Un messaggio di controllo circola fra i nodi seguendo un ordine prefissato.
- Messaggio di controllo (*token*).
- In particolare:
 - decentralizzato
 - altamente efficiente
 - il guasto di un nodo può mettere fuori uso l'intero canale



Protocolli: riepilogo

Come si può risolvere il problema della contesa di un canale condiviso?

- **Suddivisione del canale** per: tempo, frequenza, codice.
 - TDM, FDM.
- **Suddivisione casuale** (dinamica).
 - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
 - Rilevamento della portante: facile in alcune tecnologie (cablate), difficile in altre (wireless)
 - CSMA/CD usato in Ethernet
 - CSMA/CA usato in 802.11
- **A rotazione**
 - Polling con un nodo principale; a passaggio di testimone.
 - Bluetooth, FDDI, IBM Token Ring