



# Reti

(già "Reti di Calcolatori")

## Livello Collegamento Data-Link e Medium Access Control

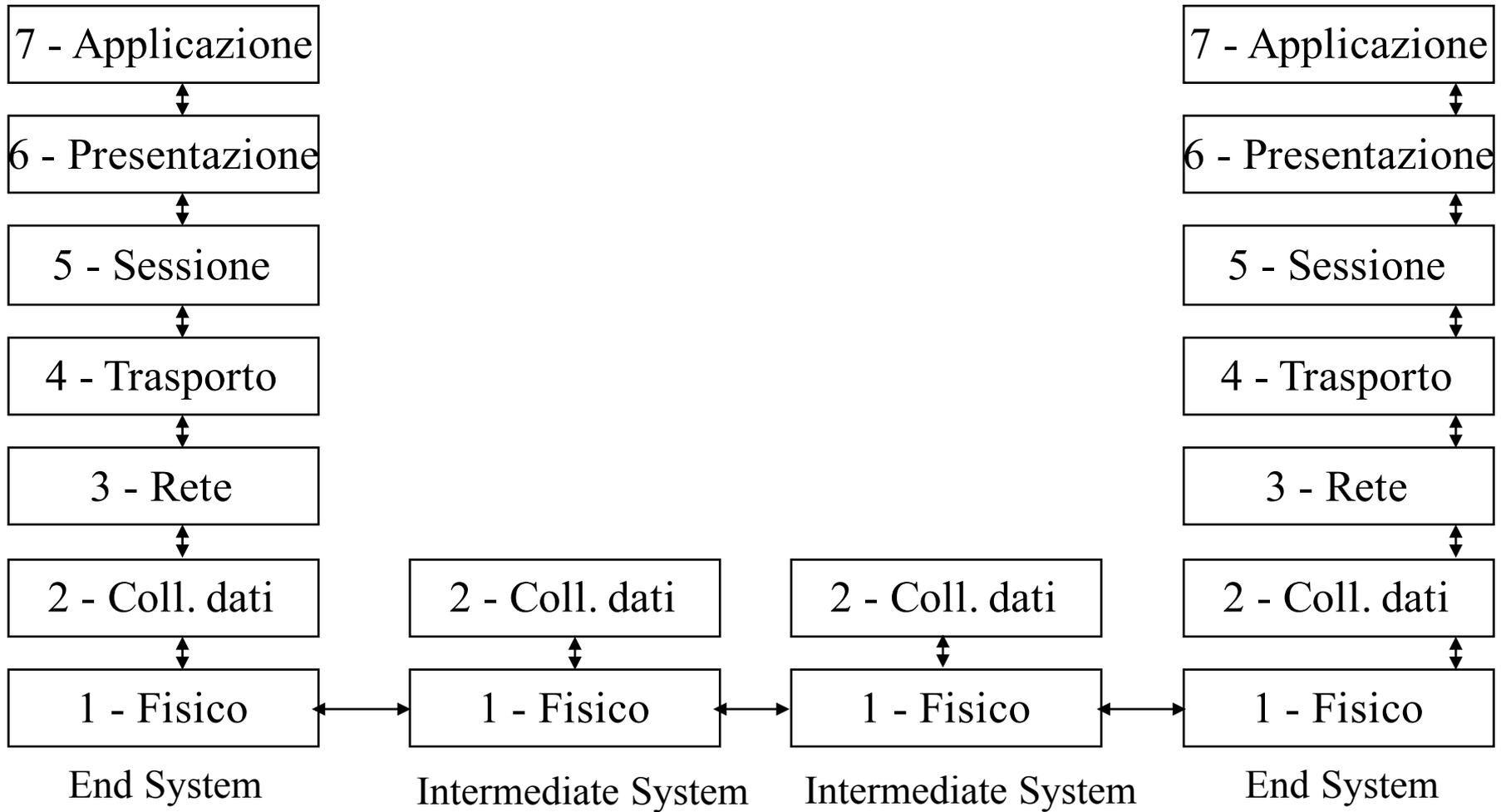
Renato Lo Cigno

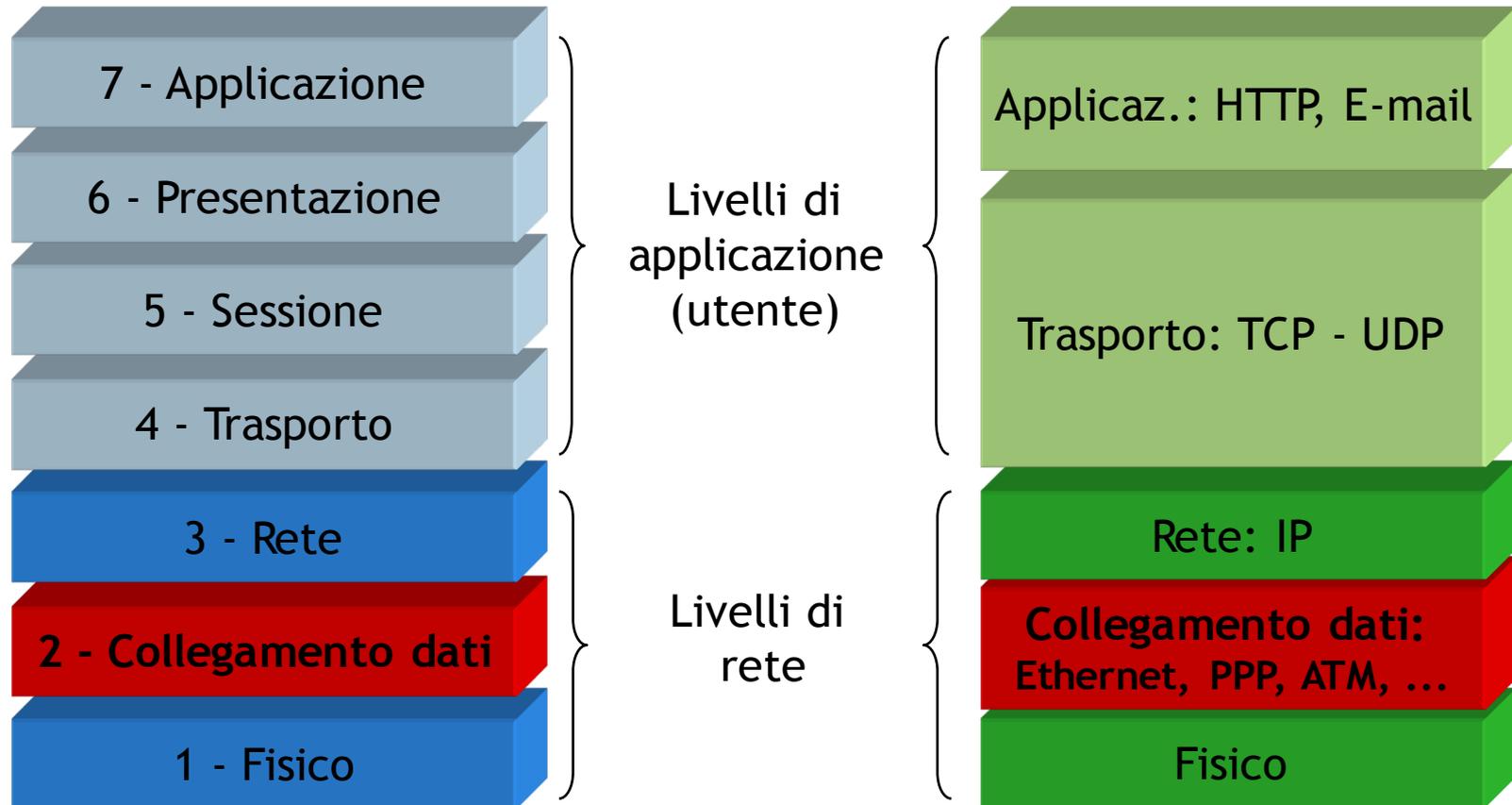
<http://disi.unitn.it/locigno/index.php/teaching-duties/computer-networks>

- *Credits*
  - *Part of the material is based on slides provided by the following authors*
    - *Jim Kurose, Keith Ross, “Computer Networking: A Top Down Approach,” 4th edition, Addison-Wesley, July 2007*
    - *Douglas Comer, “Computer Networks and Internets,” 5th edition, Prentice Hall*
    - *Behrouz A. Forouzan, Sophia Chung Fegan, “TCP/IP Protocol Suite,” McGraw-Hill, January 2005*
- La traduzione, se presente, è in generale opera (e responsabilità) del docente



# Modello a strati





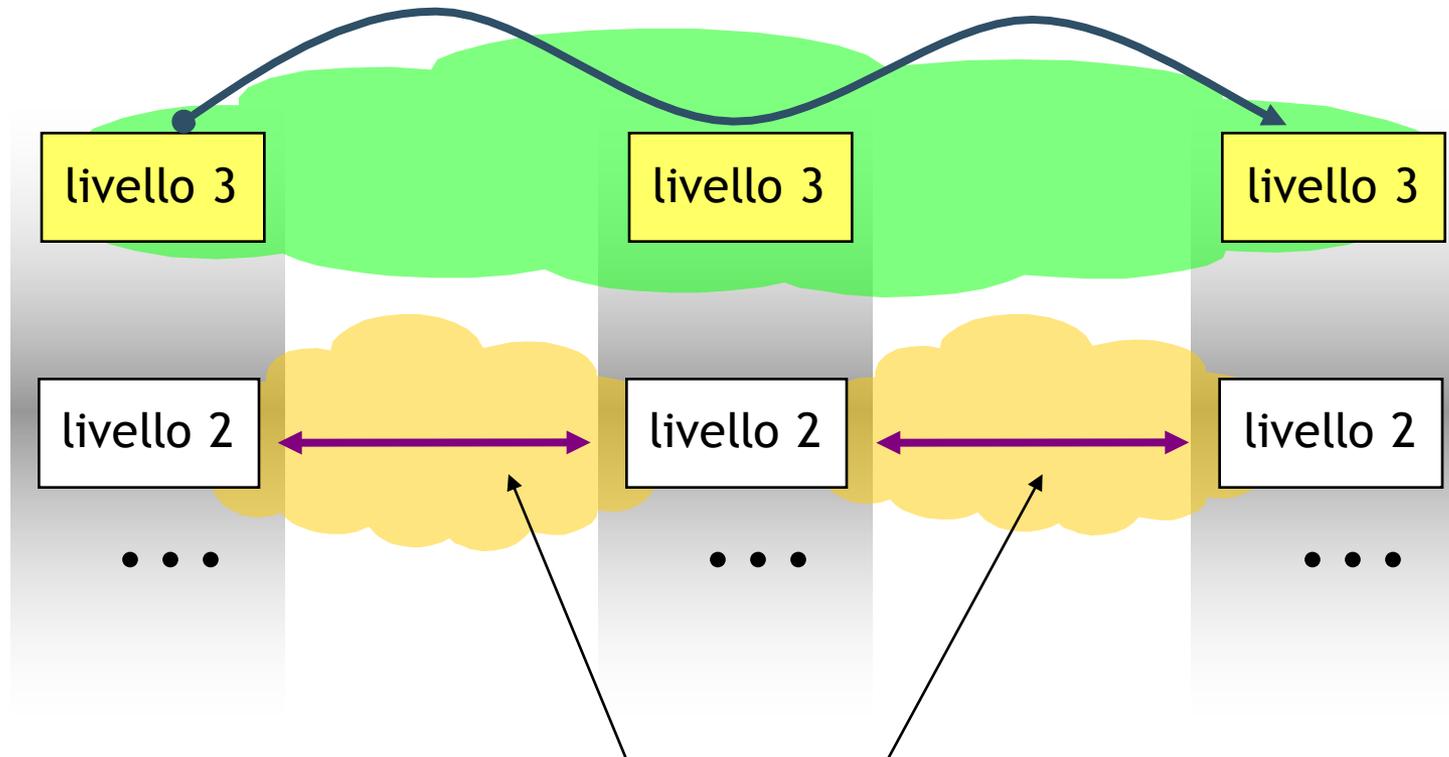


- Obiettivo principale: fornire al livello di rete di due macchine adiacenti un **canale di comunicazione** il più possibile affidabile
  - macchine adiacenti → fisicamente connesse da un canale di comunicazione (es. un cavo coassiale, doppino telefonico)
  - canale di comunicazione → “tubo di bit”, ovvero i bit sono ricevuti nello stesso ordine in cui sono inviati
- Per compiere questo obiettivo, come tutti i livelli OSI, il livello 2 offre dei servizi al livello superiore (livello di rete) e svolge una serie di funzioni
- Problema: il canale fisico non è ideale
  - errori di trasmissione tra sorgente e destinazione
  - necessità di dover gestire la velocità di trasmissione dei dati
  - ritardo di propagazione non nullo



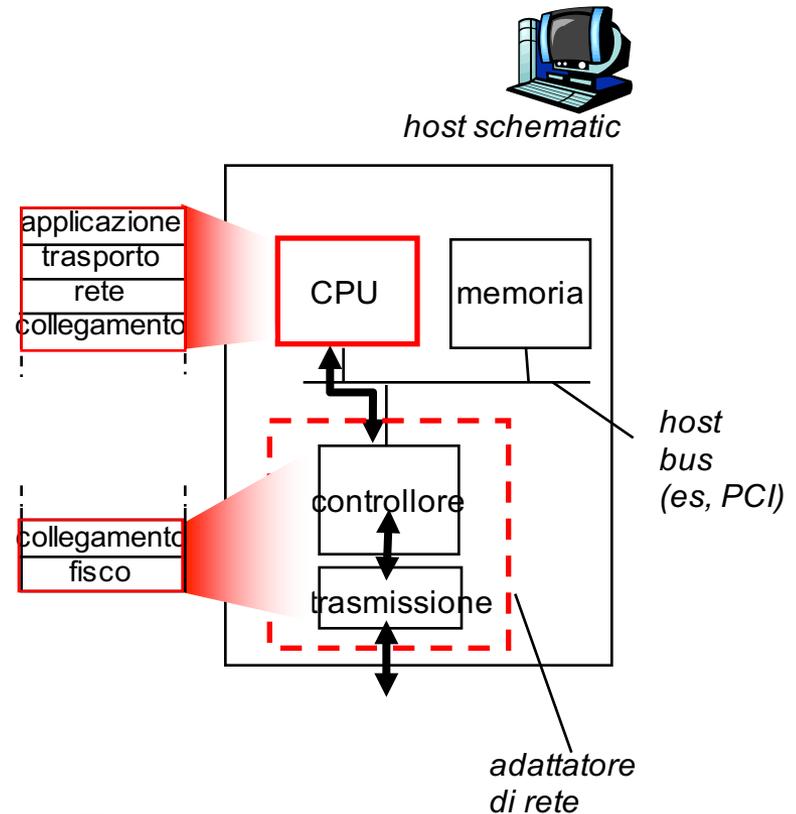
- Servizio connectionless senza riscontro (ACK)
  - non viene attivata nessuna connessione
  - invio delle trame senza attendere alcun *feedback* dalla destinazione
    - Se una trama viene persa non ci sono tentativi per recuperarla, il compito viene lasciato ai livelli superiori
  - **la maggior parte delle LAN cablate utilizzano questo servizio**
- Servizio connectionless con acknowledge
  - non viene attivata nessuna connessione
  - ogni trama inviata viene “riscontrata” in modo individuale
  - **le reti wireless LAN usano questo servizio**
- Servizio connection-oriented con acknowledge
  - viene attivata una connessione e, al termine del trasferimento, essa viene abbattuta
  - ogni trama inviata viene “riscontrata” in modo individuale
  - **le reti telefoniche/cellulari usano questo servizio**

## Visibilità estesa a tutta la rete



Visibilità limitata al singolo link (o sottorete)

- ❑ 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



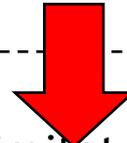


- Le principali funzioni svolte dal livello 2 sono:
  - framing
    - delimitazione delle trame
  - rilevazione/gestione errori
    - controlla se la trama contiene errori ed eventualmente gestisce il recupero
  - controllo di flusso
    - gestisce la velocità di trasmissione
  - controllo di accesso al canale per canali broadcast
    - MAC: Medium Access Control, coordina chi trasmette e chi riceve in canali con molte stazioni collegate



- Il livello 2 riceve dal livello superiore (rete) dei pacchetti
- Considerando che:
  - la lunghezza dei pacchetti (di livello 3) e delle corrispondenti trame (livello 2) è variabile
  - i sistemi non sono sincronizzati tra loro, ovvero non hanno un orologio comune che segna la stessa ora per tutti
  - il **livello 1 tratta solo bit**, e quindi non è in grado di distinguere se un bit appartiene ad una trama o a quella successiva
- ... nasce il problema della **delimitazione delle trame**
- La funzionalità di *framing* (frame = trama) è dunque di rendere distinguibile una trama dall'altra attraverso l'utilizzo di opportuni codici all'inizio e alla fine della trama stessa

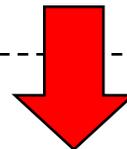
pacchetti dal livello 3



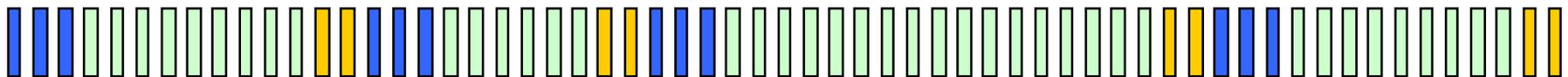
trame/frame del livello 2 con delimitatori



*[Header]*     *[trailer]*



flusso di bit del livello 1

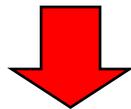




- Esistono diverse tecniche per implementare il framing:
  - inserire intervalli temporali fra trame consecutive
    - problema: per natura intrinseca le reti di telecomunicazione non danno garanzie sul rispetto delle caratteristiche temporali delle informazioni trasmesse
    - gli intervalli inseriti potrebbero essere espansi o ridotti generando problemi di ricezione
  - marcare inizio e termine di ogni trama
    1. Character count
    2. Character stuffing
    3. Starting and ending flags (bit stuffing)
    4. Physical layer coding violations



- Ogni trama inizia e termina con una sequenza di caratteri ASCII ben definita
  - DLE (Data Link Escape) + STX (Start of TeXt)
  - DLE (Data Link Escape) + ETX (End of TeXt)
- Se nella trasmissione di dati binari, una sottosequenza di bit corrisponde ai caratteri speciali...

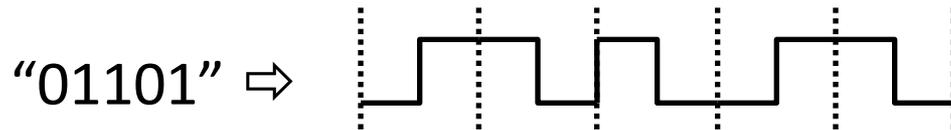


- ...la sorgente duplica il carattere DLE
  - **character stuffing**



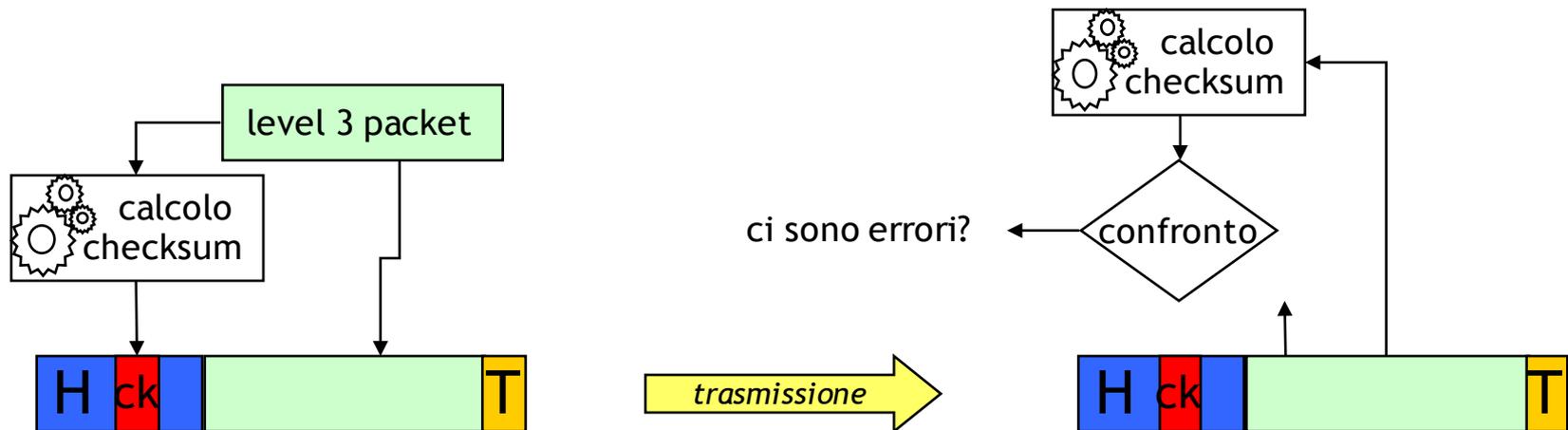
- Ogni trama può includere un numero arbitrario di bit
- Ogni trama inizia e termina con uno speciale pattern di bit, 01111110, chiamato **byte di flag**
- In trasmissione se la sorgente incontra 5 bit “1” consecutivi, aggiunge uno “0” (indipendentemente dal bit che segue)
  - **bit stuffing**
  - es. la sequenza “01111110” è trasmessa come “0111111010”
- Il ricevitore quando riceve 5 “1” consecutivi elimina sempre lo 0 che segue, ripristinando la sequenza originale

- Tecnica basata su sistemi che utilizzano ridondanza a livello fisico
  - es. ogni bit di informazione viene trasmesso utilizzando una combinazione di due simboli "alto" e "basso" a livello fisico
    - '1'  $\Rightarrow$  'AB'
    - '0'  $\Rightarrow$  'BA'



- 'AA' e 'BB' non sono usate per i dati e possono essere quindi utilizzate per delimitare la trama

- Il livello fisico offre un canale di trasmissione **con errori**
  - errori sul singolo bit
  - replicazione di bit
  - perdita di bit
- Per la rilevazione di tali errori, nell'header di ogni trama il livello 2 inserisce un campo di controllo (checksum)
- I checksum è il risultato di un calcolo fatto utilizzando i bit della trama
- la destinazione ripete il calcolo e confronta il risultato con il checksum: se coincide la trama è corretta



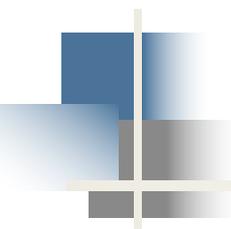


- Realizzato con protocolli a finestra (v. liv. trasporto), in genere stop&wait
- Il controllo della velocità di trasmissione della sorgente è basato su feedback inviati alla sorgente dalla destinazione indicando
  - di bloccare la trasmissione fino a comando successivo
  - la quantità di informazione che la destinazione è ancora in grado di gestire
- I feedback possono essere
  - nei servizi con riscontro, gli ack stessi
  - nei servizi senza riscontro, dei pacchetti appositi



# Correzione errori ARQ

- Spesso assente nelle reti locali cablate
- Presente invece normalmente nelle reti wireless LAN
- Presente nelle reti tradizionali di tipo geografico
- Come a livello trasporto basato su protocolli a finestra
  - normalmente stop&wait
  - sul singolo canale non ho problemi di ritardo variabile
- Ritrasmissione dell'intera trama, controllo basato su CRC

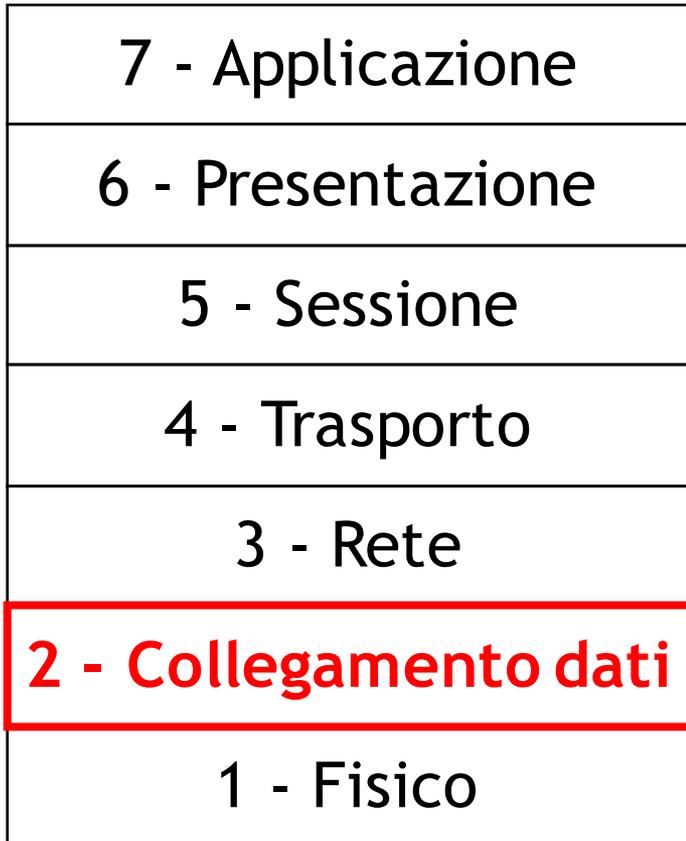


# Il sotto-livello MAC

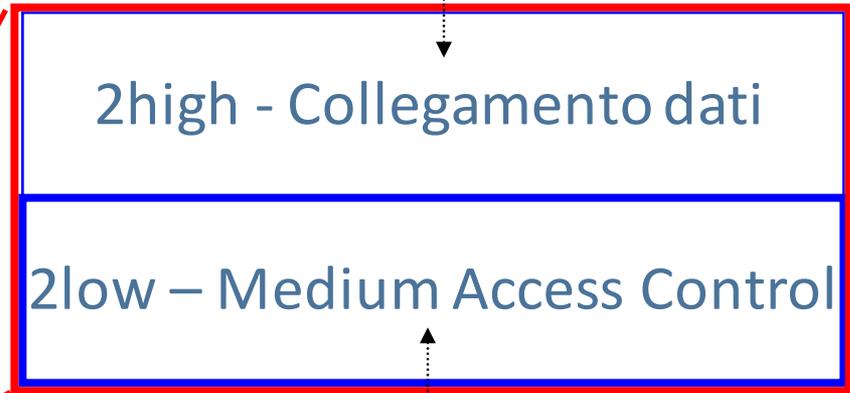
---



- Il livello 2 è direttamente collegato al livello fisico e al mezzo di comunicazione
- Il mezzo può essere:
  - dedicato (reti punto-punto)
  - condiviso (reti broadcast)
- Se il mezzo fisico è condiviso, è necessario coordinare l'accesso
  - gestione della competizione per la risorsa trasmissiva
  - selezione dell'host che ha il diritto di trasmettere
- Viene introdotto un sotto-livello al livello 2 che gestisce l'accesso
  - **MAC (Medium Access Control)**



Gestisce le altre funzionalità del livello 2, in particolare il controllo di flusso



Gestisce le politiche/regole di accesso ad un mezzo condiviso



- Per mezzo **condiviso** si intende che un unico canale trasmissivo può essere usato da più sorgenti
  - laptop e smartphone collegati con WiFi condividono “l’etere” ovvero le onde radio che trasportano i segnali
  - PC collegati a un cavo coassiale condividono il cavo stesso
- È necessario definire una serie di regole per poter utilizzare il mezzo (tecniche di allocazione del canale)
  - se due sorgenti parlano contemporaneamente vi sarà collisione è l’informazione andrà persa



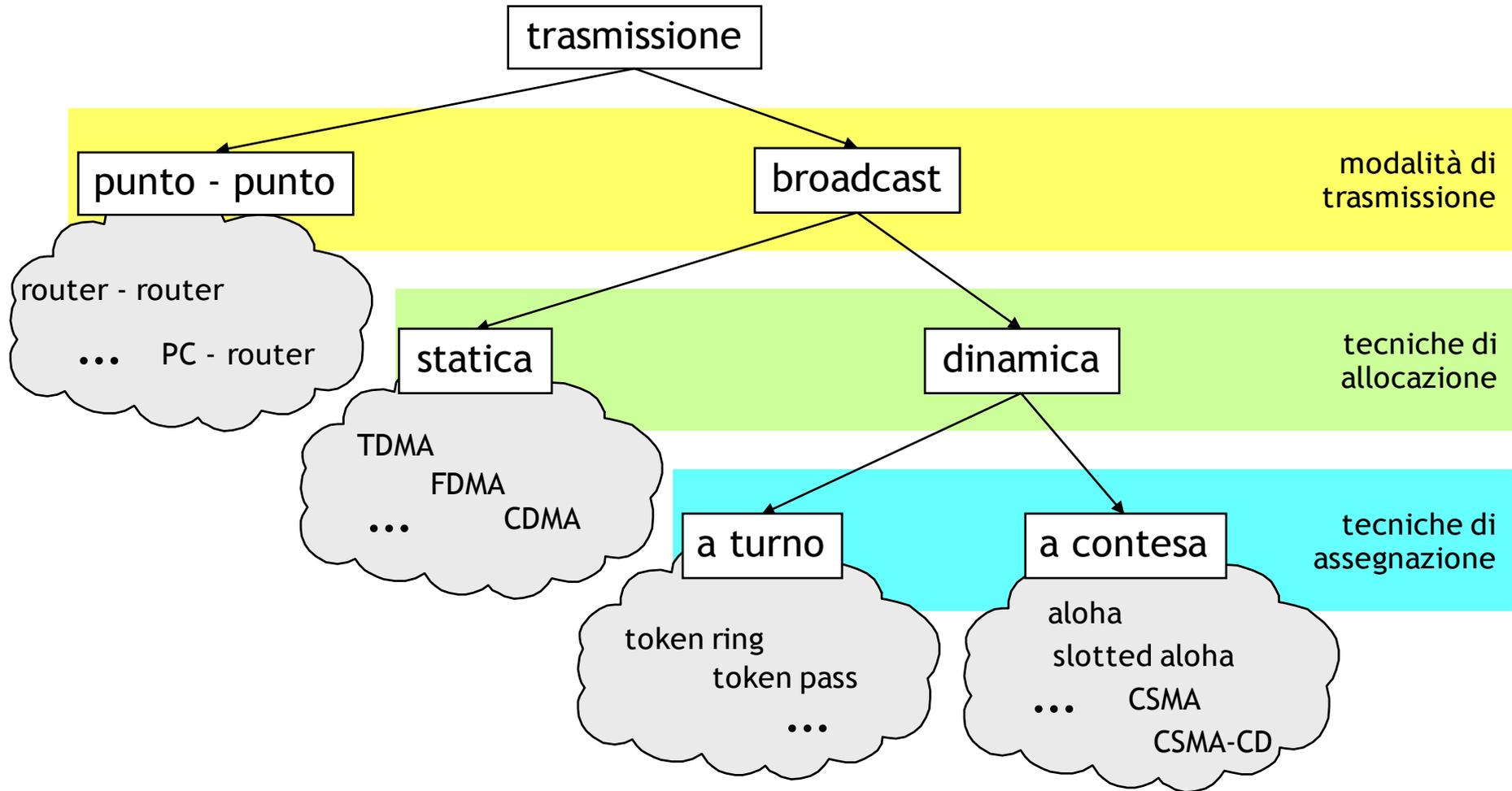
- Due categorie di allocazione del canale trasmissivo
  - allocazione statica
    - il mezzo trasmissivo viene “partizionato” e ogni porzione viene data alle diverse sorgenti
    - il partizionamento può avvenire in base:
      - al tempo: ogni sorgente ha a disposizione il mezzo per un determinato periodo
      - alla frequenza: ogni sorgente ha a disposizione una determinata frequenza
  - allocazione dinamica
    - il canale viene assegnato di volta in volta a chi ne fa richiesta



- Frequency Division Multiple Access (FDMA)
- Time Division Multiple Access (TDMA)
- Code Division Multiple Access (CDMA)
- Buona efficienza in situazioni di **pochi utenti con molto carico costante nel tempo**
- Meccanismi di semplice implementazione (FDM)
- Tuttavia ...
  - molti utenti
  - traffico discontinuo
- ... portano a scarsa efficienza di utilizzo delle risorse trasmissive
  - le risorse dedicate agli utenti “momentaneamente silenziosi” sono perse



- Il canale trasmissivo può essere assegnato:
  - a turno: viene distribuito il “permesso” di trasmettere; la durata viene decisa dalla sorgente
  - a contesa: ciascuna sorgente prova a trasmettere indipendentemente dalle altre
- Nel primo caso devono esistere meccanismi per l’assegnazione del permesso di trasmettere
  - overhead di gestione
  - sono i protocolli più usati nelle reti cellulari
- Nel secondo caso non sono previsti meccanismi particolari
  - sorgente e destinazione sono il più semplici possibile
  - sono i protocolli più usati nelle reti LAN





Ipotesi e regole del gioco per l'analisi delle caratteristiche e prestazioni dei protocolli a contesa

## Single channel assumption

- unico canale per tutte le comunicazioni e tempo di propagazione trascurabile

## Station model

- $N$  stazioni indipendenti ognuna delle quali è sorgente di trame di livello 2
- trame generate secondo la distribuzione di Poisson con media  $G$
- la lunghezza delle trame è fissa, ovvero il tempo di trasmissione è costante e pari a  $T$  (tempo di trama)
- una volta generata una trama, la stazione è bloccata fino al momento di corretta trasmissione

## Collision assumption

- due trame contemporaneamente presenti sul canale generano collisione
- non sono presenti altre forme di errore

## Tempo...

- *continuo*: la trasmissione della trama può iniziare in qualunque istante
- *slotted*: la trasmissione della trama può iniziare solo in istanti discreti

## Ascolto del canale...

- *carrier sense*: le stazioni sono in grado di verificare se il canale è in uso prima di iniziare la trasmissione di una trama

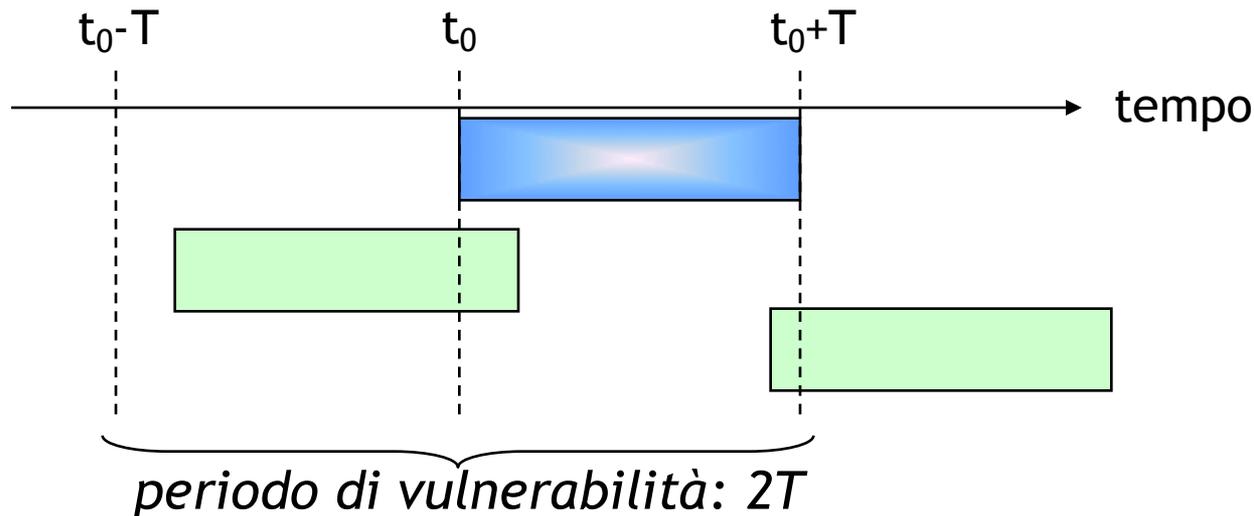


- In letteratura sono disponibili molti algoritmi di accesso multiplo al mezzo condiviso con contesa
- Principali algoritmi (utilizzati dai protocolli):
  - ALOHA
    - Pure ALOHA
    - Slotted ALOHA
  - Carrier Sense Multiple Access Protocols
    - CSMA
    - CSMA-CD (Collision Detection: con rilevazione della collisione)
    - CSMA-CA (Collision Avoidance: con tecniche per ridurre la probabilità di collisione)



- Definito nel 1970 da N. Abramson all'università delle Hawaii
- Algoritmo:
  - una sorgente può trasmettere una trama ogniqualvolta vi sono dati da inviare (*continuous time*)
- **collisione**  $\Rightarrow$  la sorgente aspetta un tempo **casuale** e ritrasmette la trama
  - un tempo deterministico porterebbe ad una situazione di collisione all'infinito

- Si definisce “periodo di vulnerabilità” l’intervallo di tempo in cui può avvenire una collisione che invalida una trasmissione
- Detto  $T$  il tempo di trama e  $t_0$  l’inizio della trasmissione da parte di una sorgente, il periodo di vulnerabilità è pari al doppio del tempo di trama
  - nel momento in cui inizia a trasmettere ( $t_0$ ), nessuna altra sorgente deve aver iniziato la trasmissione dopo l’istante di tempo  $t_0 - T$  e nessuna altra sorgente deve iniziare la trasmissione fino a  $t_0 + T$





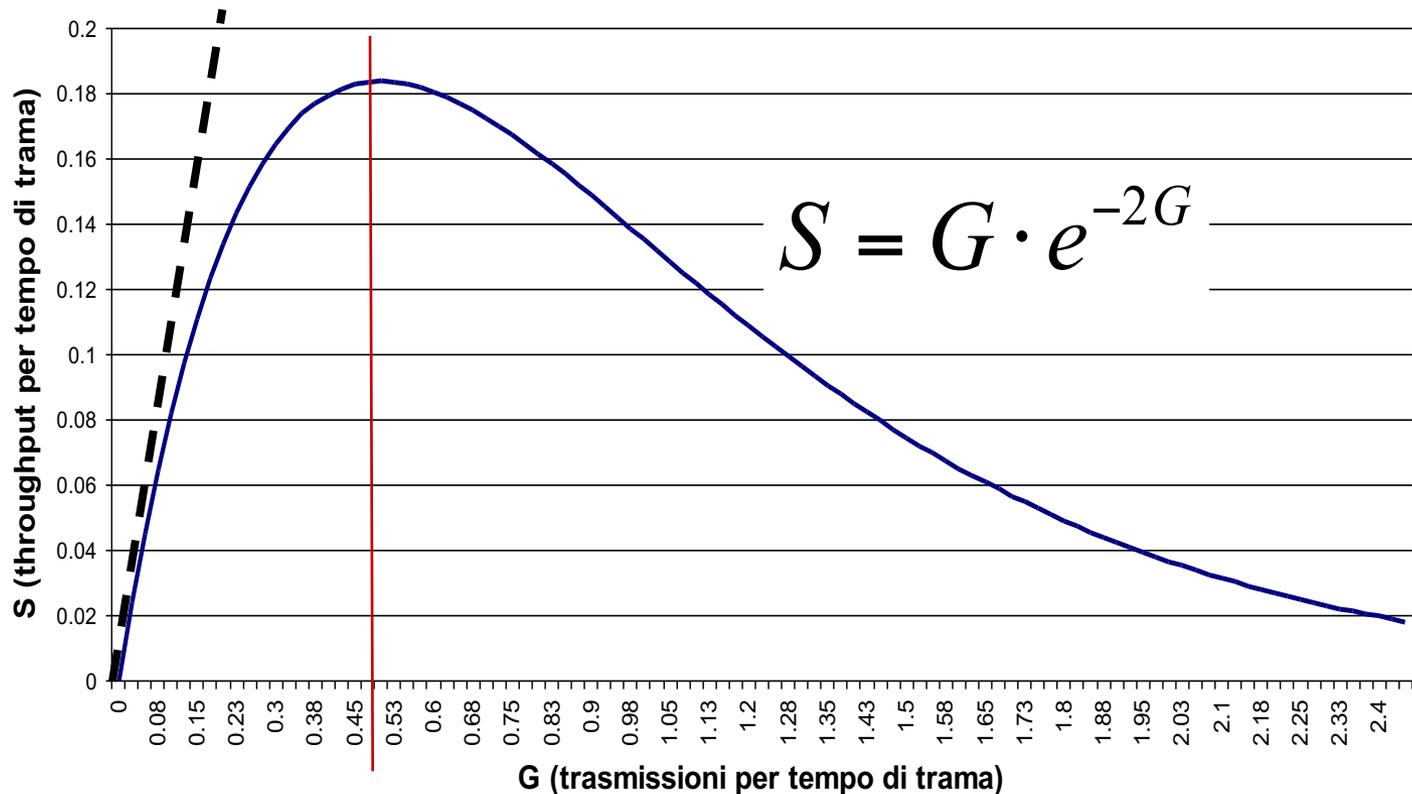
- Ipotesi
  - trame di lunghezza fissa (o distribuite in modo esponenziale, non cambia)
  - tempo di trama: tempo (medio) necessario per trasmettere una trama
  - numero di stazioni infinito (o comunque molto grande)
- Traffico generato (numero di trame per tempo di trama) segue la distribuzione di Poisson con media  $G$ 
  - $G$  ingloba anche il numero di ri-trasmissioni dovuto a collisioni
- Il throughput reale è dato da
  - numero medio di trasmissioni \* probabilità che non ci siano trasmissioni per tutto il periodo di vulnerabilità (2 tempi di trama consecutivi)

→  $S = G * P[0 \text{ trasmissioni per } 2T]$ , ovvero

$$S = G \cdot e^{-2G}$$

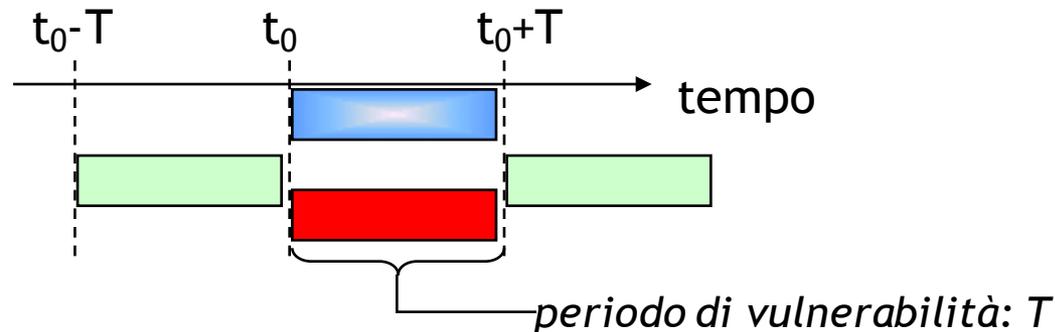
**$G$  = numero medio di trame trasmesse nel tempo di trama**

**$S$  = numero medio di trame trasmesse con successo (throughput)**



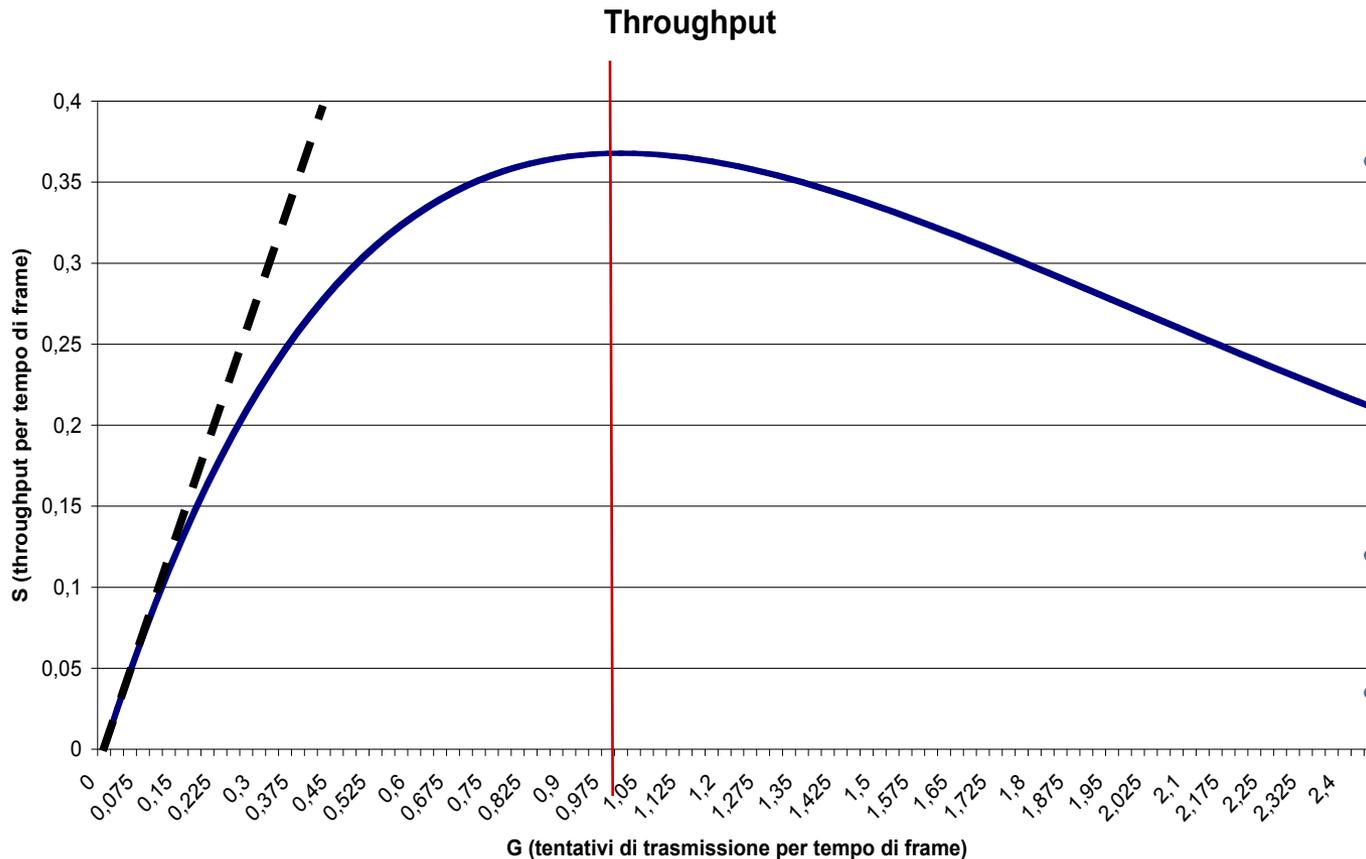
- ALOHA permette al massimo di sfruttare il 19% del tempo, il massimo si ha quando il traffico offerto è  $\sim 0.5$  volte la capacità del canale. **Protocollo instabile!!**

- Proposto nel 1972 da Roberts per migliorare la capacità di Pure ALOHA
- Basato su ipotesi di *slotted time* (tempo suddiviso ad intervalli discreti)
- Algoritmo:
  - Pure ALOHA
  - la trasmissione di una trama può iniziare solo ad intervalli discreti
  - necessaria sincronizzazione tra stazioni
- Periodo di vulnerabilità:  $T$  (tempo di trama)



Il periodo di vulnerabilità è dimezzato, quindi il throughput reale è dato da

$$S = G \cdot e^{-G}$$



- Slotted ALOHA permette al massimo di sfruttare il 37% degli slot liberi a carico  $\sim 1$
- Il protocollo è instabile!!
- Bisogna distribuire un sincronismo

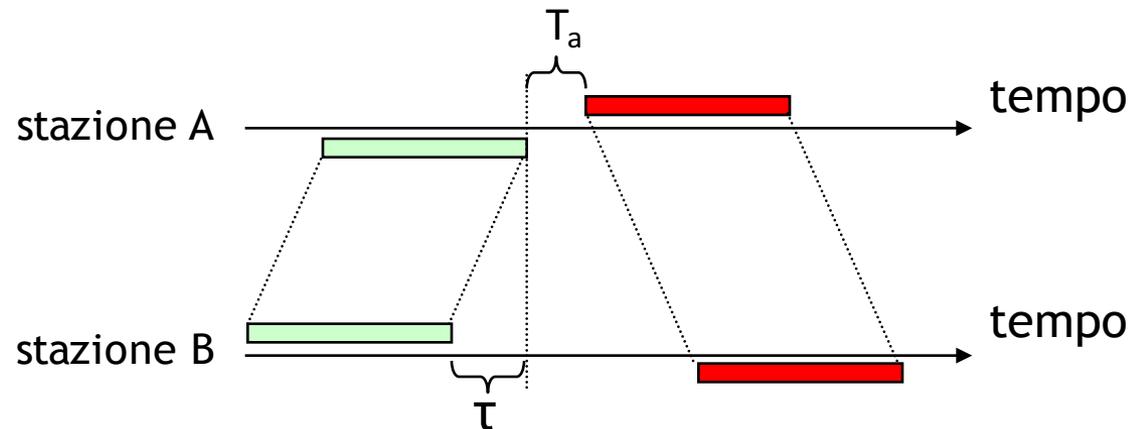
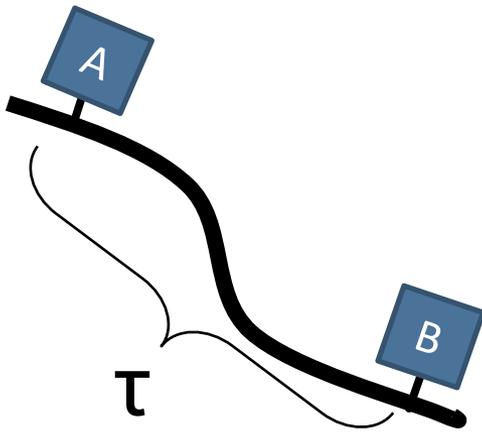


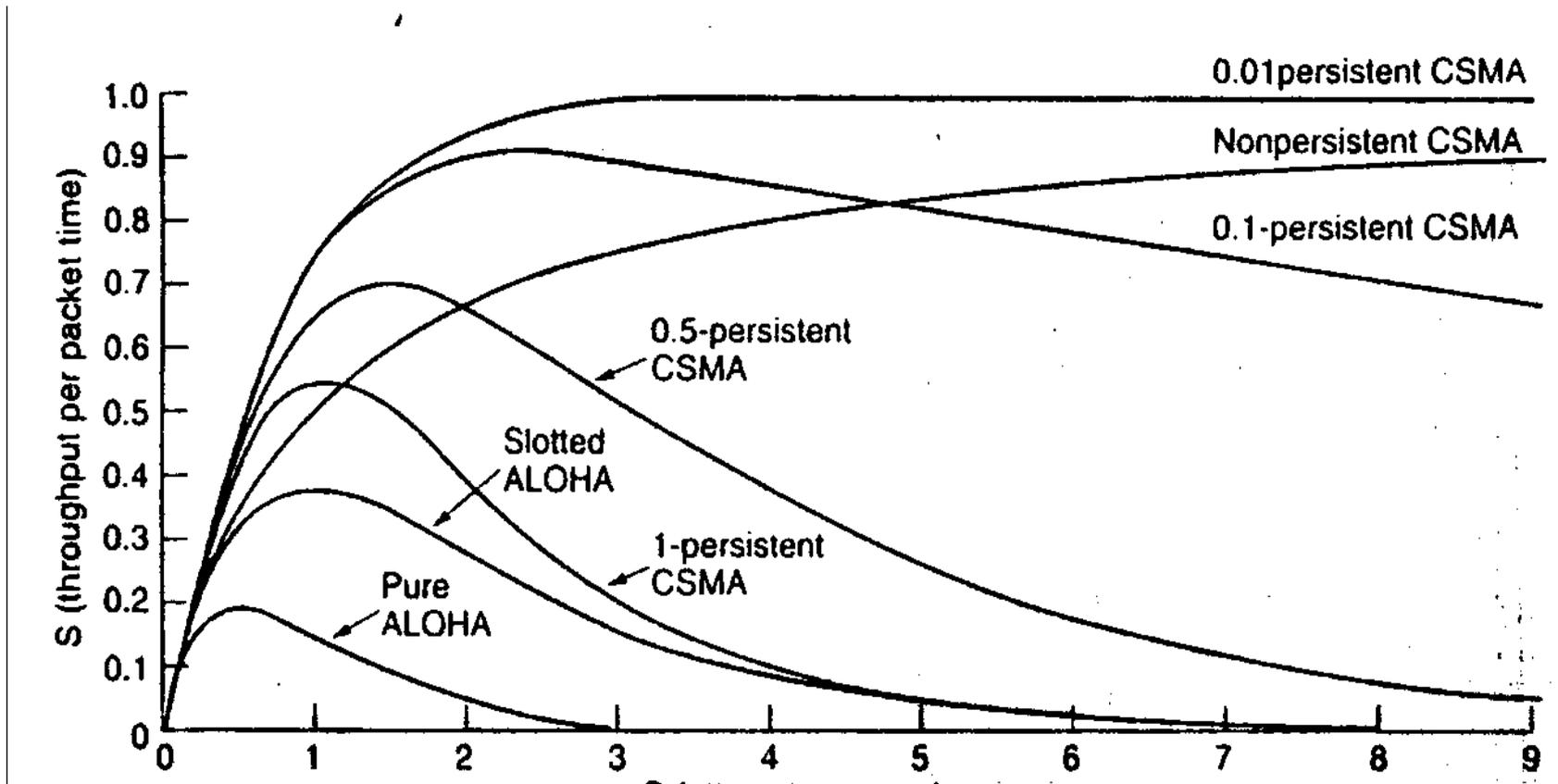
- Le stazioni possono monitorare lo stato del canale di trasmissione
- Le stazioni sono in grado di “ascoltare” il canale **prima di iniziare a trasmettere** per verificare se c'è una trasmissione in corso
  - se il canale è libero, si trasmette
  - se è occupato, sono possibili diverse varianti
    - non-persistent (0-persistent)
      - rimanda la trasmissione ad un nuovo istante  $t_1 \gg t_0 + T$ , scelto in modo casuale
    - persistent (1-persistent)
      - nel momento in cui si libera il canale, la stazione inizia a trasmettere
  - se c'è collisione, come in ALOHA, si attende un tempo casuale e poi si cerca di ritrasmettere



- ascolta il canale
  - se il canale è libero **si trasmette**;
  - se è occupato, si attende che il canale diventi libero
    - quando il canale è libero
      - si trasmette con probabilità  $p$
      - con probabilità  $(1-p)$  si rimanda la trasmissione ad un nuovo istante  $t_1 \gg t_0+T$ , scelto in modo casuale
  - se c'è collisione
    - si rimanda la trasmissione ad un nuovo istante  $t_1 \gg t_0+T$ , scelto in modo casuale

- legato al ritardo di propagazione del segnale  $\tau$ , e al tempo necessario a rilevare il segnale sul canale  $T_a$ 
  - se una stazione ha iniziato a trasmettere, ma il suo segnale non è ancora arrivato a tutte le stazioni, qualcun altro potrebbe iniziare la trasmissione
  - periodo di vulnerabilità  $T_v = \tau + T_a$
- In generale, il CSMA viene usato in reti in cui il ritardo di propagazione  $\tau$  è  $\ll$  di  $T$  (tempo di trama)





(fonte: A. Tanenbaum, Computer Networks)



- Miglioramento
  - le stazioni che sta trasmettendo rilevano la collisione, interrompono immediatamente la trasmissione
- In questo modo, una volta rilevata collisione, non si spreca tempo a trasmettere trame già corrotte
- CSMA-CD 1p diventa molto efficiente e si può rendere stabile
- Per rilevare una collisione si ascolta il canale se la potenza presente è superiore a quella che sto trasmettendo ...
- CD si può usare solamente sulle reti cablate perché sulle reti wireless è sostanzialmente impossibile rilevare un segnale “aggiuntivo” rispetto a quello trasmesso



- Se non è possibile rilevare le collisioni e se il tempo di trasmissione è grande rispetto alla propagazione ( $T \gg \tau + T_a$ )
  - Situazione tipica delle reti Wireless LAN
- Allora non conviene comportarsi in modo 1p perchè le collisioni costano molto care
- Collision Avoidance consiste nel comportarsi in modo p-persistente con una persistenza che dipende dalla situazione della rete
- Termine introdotto nelle wireless LAN con CSMA, per differenziare il nome del protocollo da quello usato sulle reti cablate
- Maggiori dettagli nella parte dedicata a Ethernet e WiFi.