

Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"  
Laurea in Informatica

Sistemi Operativi e Reti  
(modulo Reti)  
a.a. 2024/2025

# Wireless e Reti Mobili (parte1)

dr. Manuel Fiorelli

[manuel.fiorelli@uniroma2.it](mailto:manuel.fiorelli@uniroma2.it)

<https://art.uniroma2.it/fiorelli>

Basate sulle slide del libro di testo:

[https://gaia.cs.umass.edu/kurose\\_ross/ppt.php](https://gaia.cs.umass.edu/kurose_ross/ppt.php)

# Wireless e reti mobili: contesto

- più abbonati alla telefonia wireless (mobile) che alla telefonia fissa (via cavo) (10 a 1 nel 2019)!
- più dispositivi connessi alla banda larga mobile che dispositivi connessi alla banda larga fissa (5 a 1 nel 2019)!
  - le reti cellulari 4G/5G abbracciano ora lo stack di protocolli Internet, compreso SDN
- due sfide importanti (ma diverse)
  - **wireless**: comunicazione su collegamento wireless
  - **mobilità**: gestione dell'utente mobile che cambia punto di aggancio alla rete

# Sommario

## ■ Introduzione

### Wireless

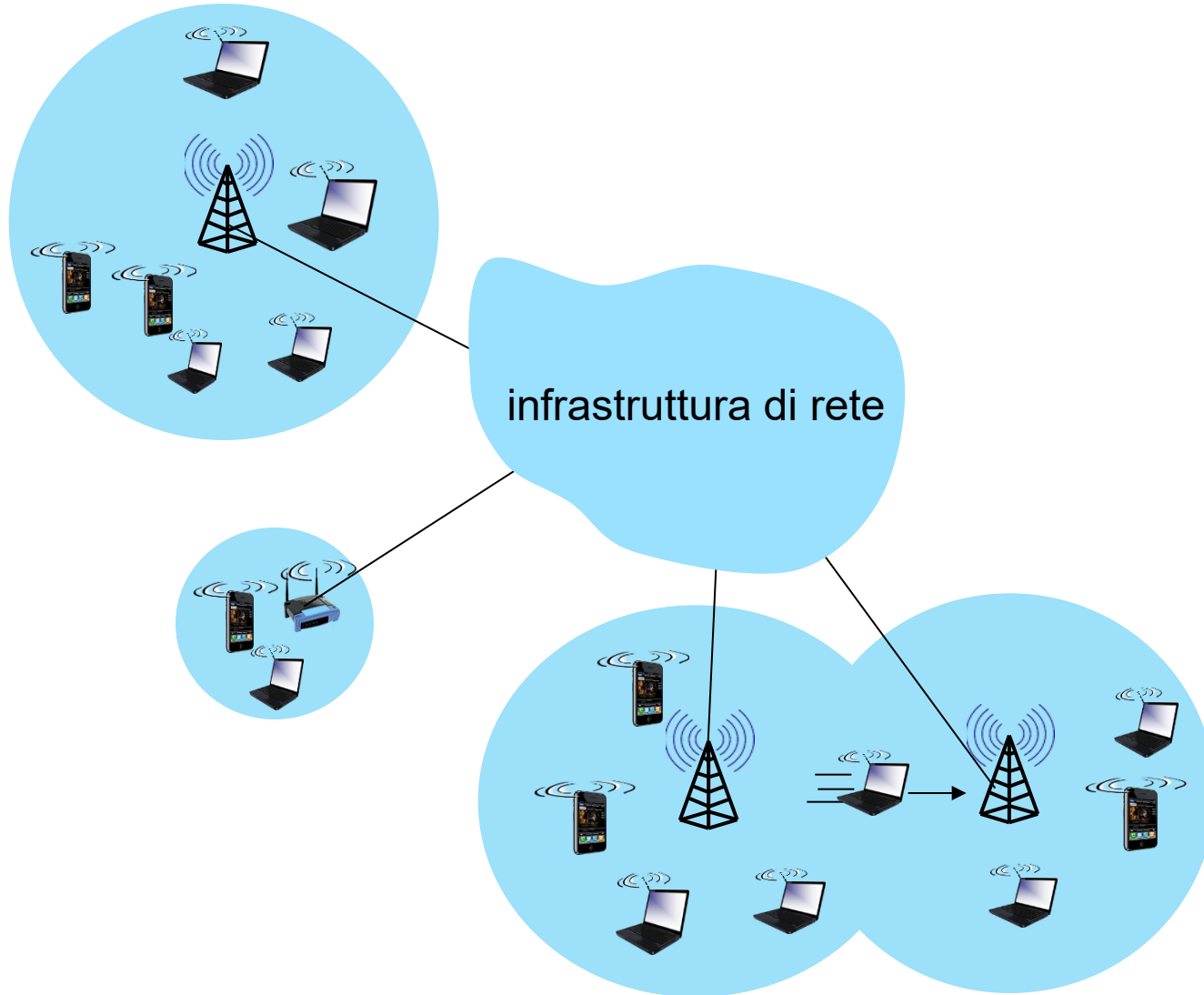
- Collegamenti wireless e caratteristiche della rete
- WiFi: 802.11 wireless LAN
- Reti cellulari: 4G e 5G
- Bluetooth



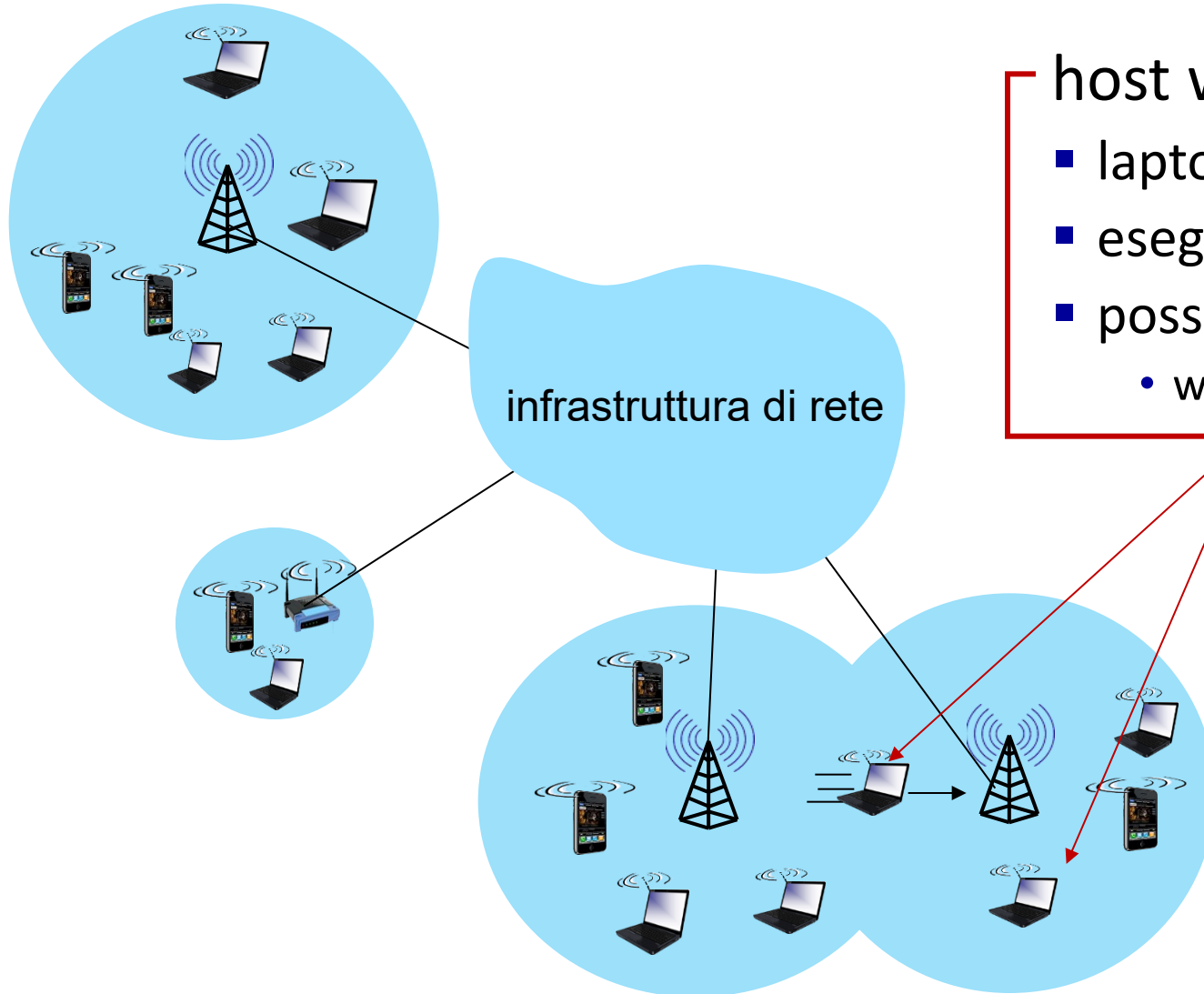
### Mobilità

- Gestione della mobilità: principi
- Gestione della mobilità: pratica
  - reti 4G/5G
  - Mobile IP
- Mobilità: impatto sui protocolli di livello superiore

# Componenti di una rete wireless



# Componenti di una rete wireless

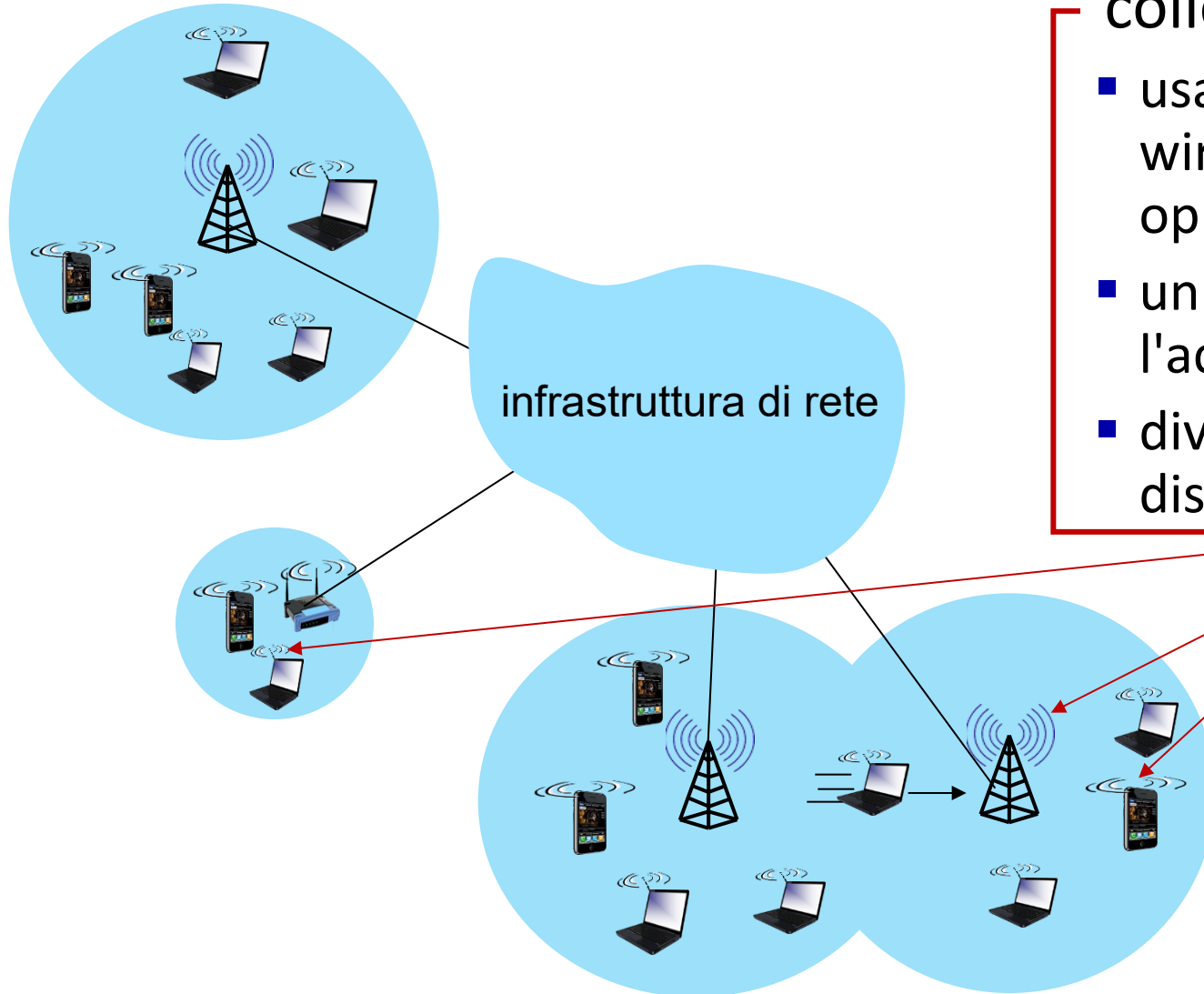


## host wireless

- laptop, smartphone, IoT
- eseguono le applicazioni
- possono essere fissi (stazionari) o mobili
  - wireless *non* significa necessariamente mobilità!



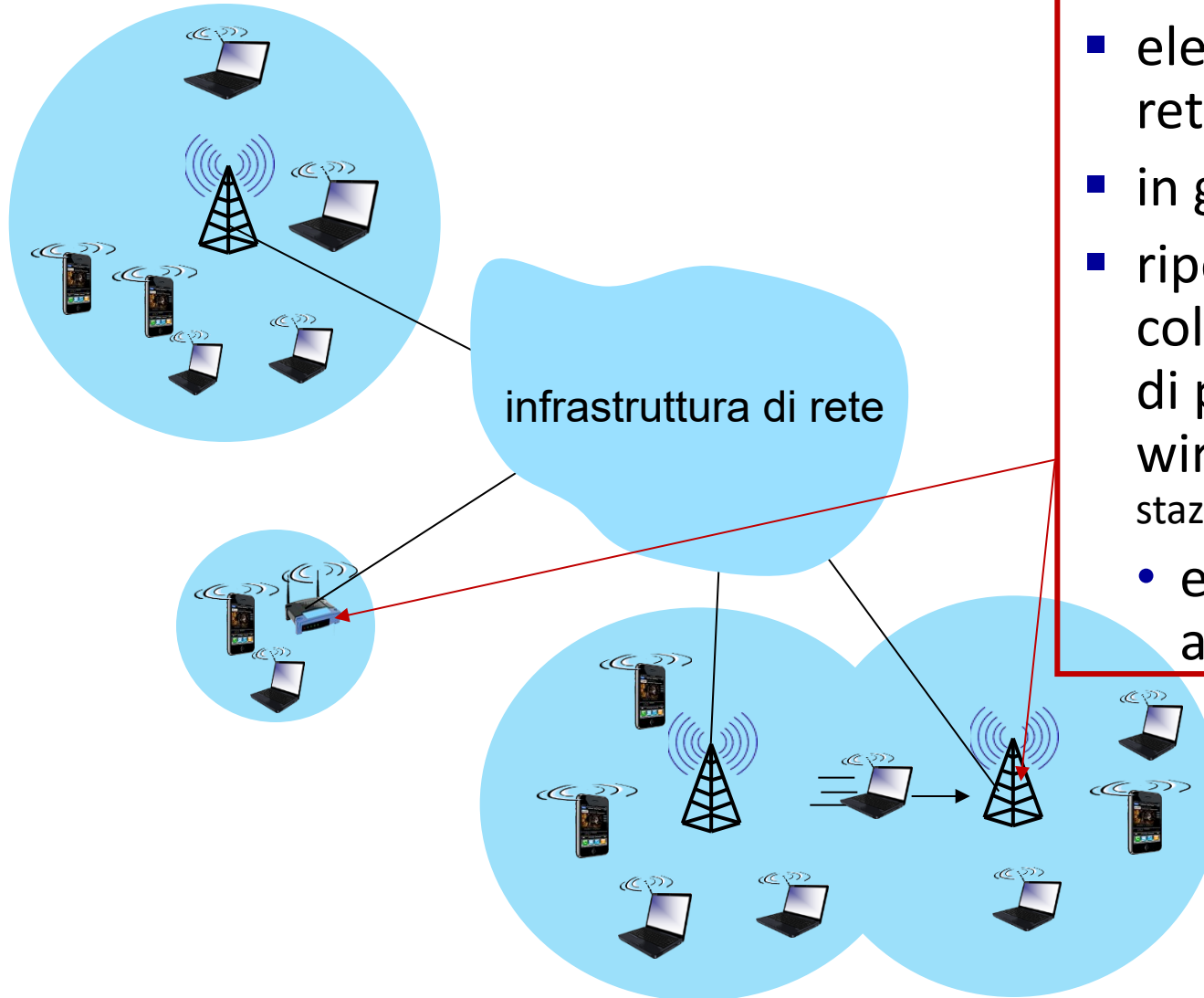
# Componenti di una rete wireless



collegamento wireless ((i)))

- usato in genere per collegare un host wireless alla stazione base (vedi dopo) oppure ad un altro host wireless
- un protocollo ad accesso multiplo regola l'accesso al collegamento
- diversi tassi trasmissivi e massime distanze utile, diverse bande di frequenza

# Componenti di una rete wireless

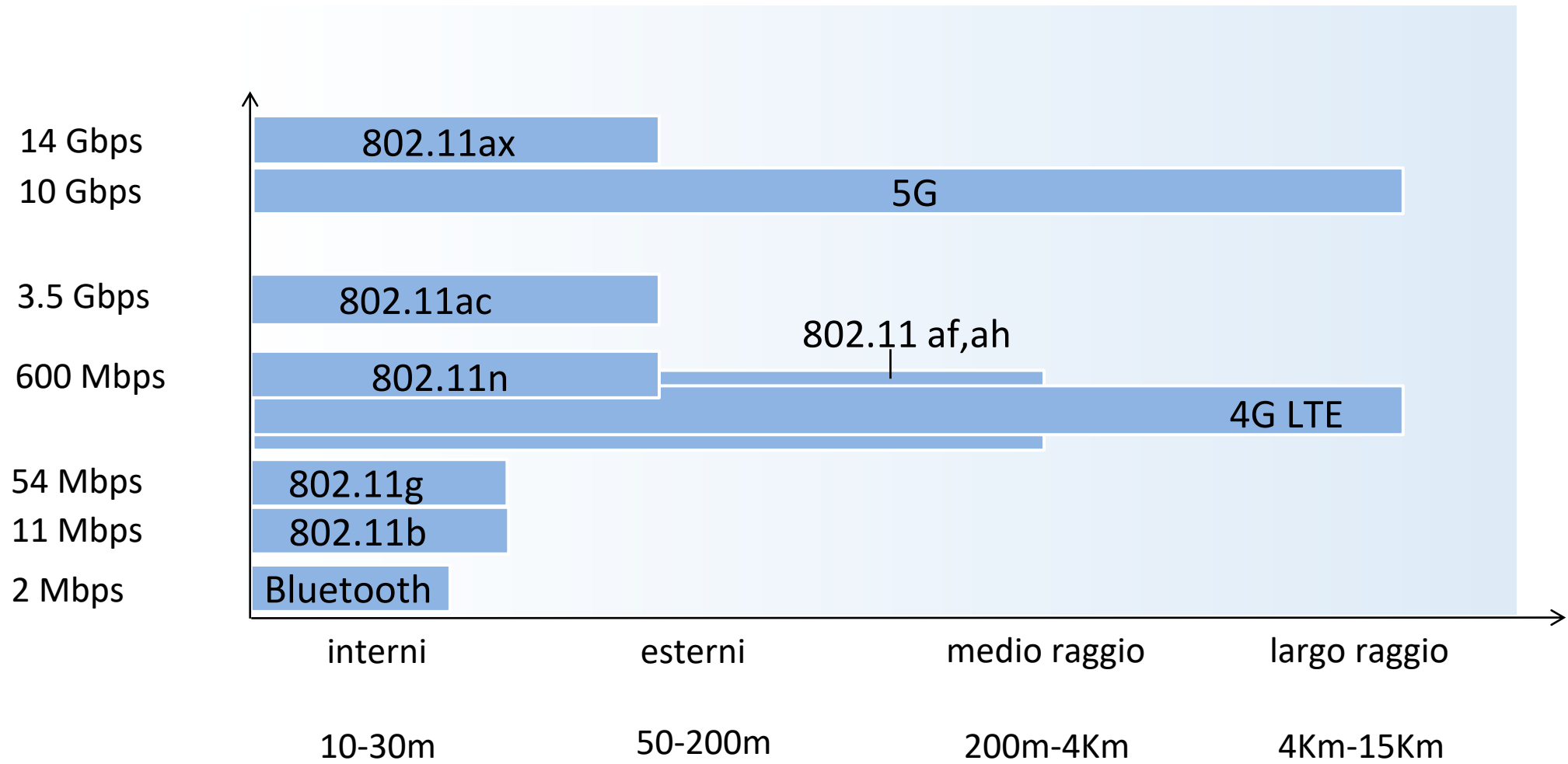


stazione base



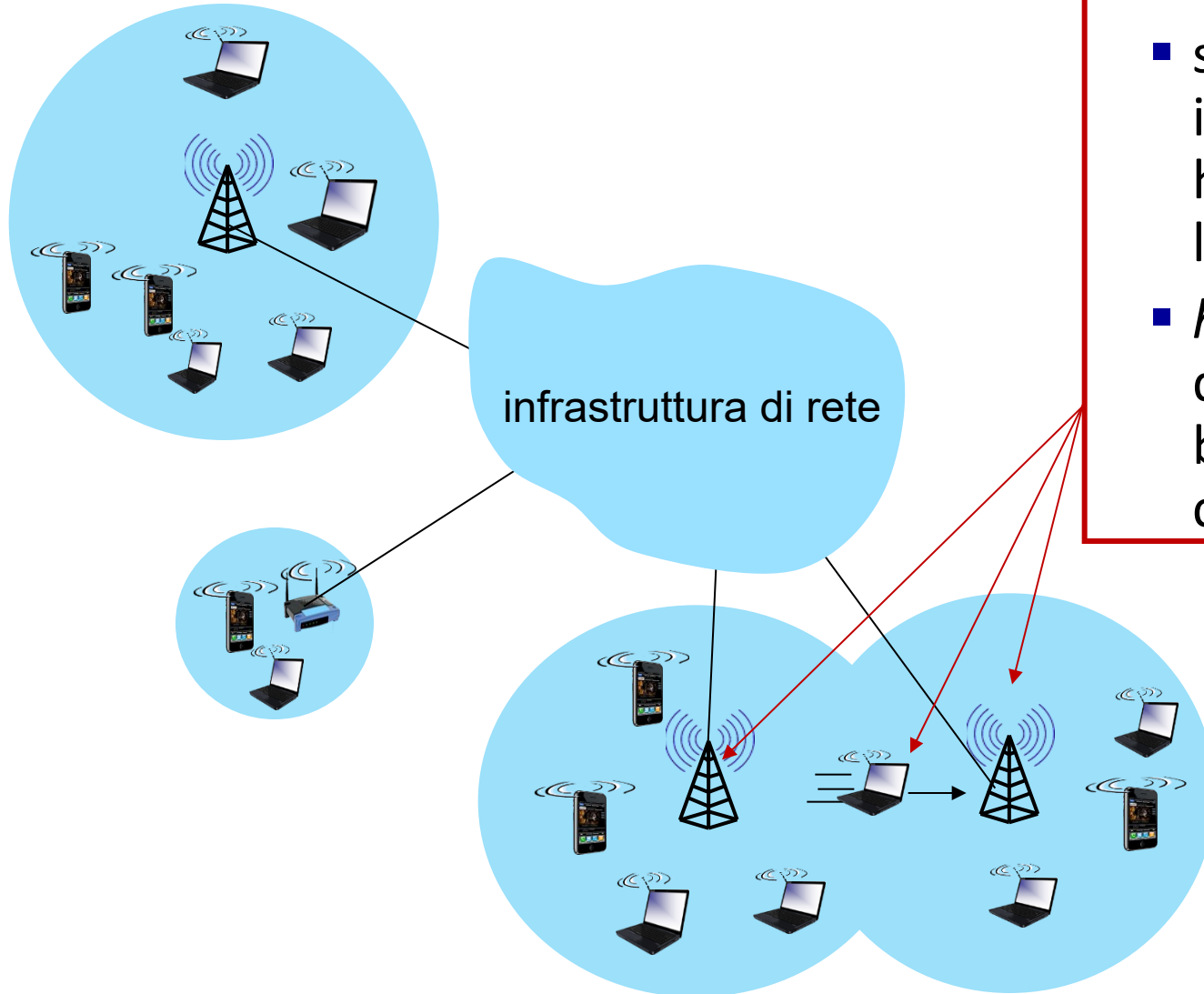
- elemento chiave dell'infrastruttura di rete wireless
- in genere connessa a una rete cablata
- ripetitore (*relay*) a livello di collegamento – responsabile dell'invio di pacchetti tra reti cablate e host wireless nella sua "area" (associati alla stazione base)
  - es. cell tower nelle reti cellulari, access point nelle LAN 802.11

# Caratteristiche dei collegamenti wireless selezionati





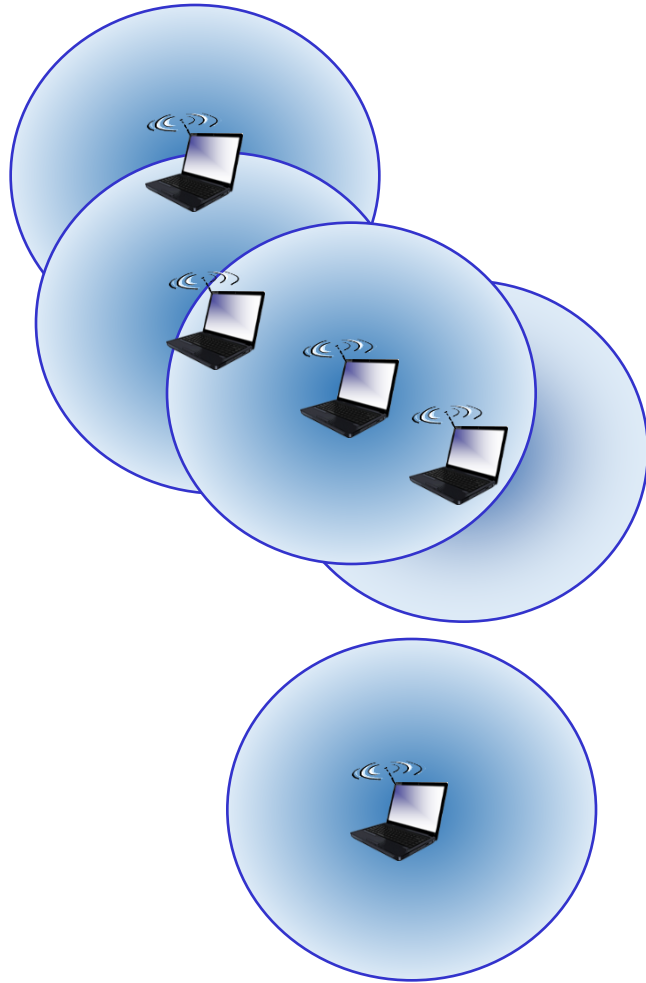
# Componenti di una rete wireless



## modalità infrastruttura

- servizi di rete (es. indirizzamento, instradamento) forniti dalla rete cui gli host wireless sono connessi attraverso la stazione base
- *handoff*: quando l'host si sposta dall'area di copertura di una stazione base a un'altra cambia il suo punto di collegamento con la rete più ampia

# Componenti di una rete wireless



## reti ad hoc

- non ci sono stazioni base
- gli host wireless possono trasmettere solo a altri nodi entro la copertura del collegamento
- gli host stessi provvedono ai servizi d'instradamento, di assegnazione degli indirizzi, traduzione dei nomi simil-DNS

# Tassonomia delle reti wireless

	hop singolo	hop multipli
infrastruttura (es., stazione base)	<p>l'host si collega a una stazione base, che lo collega al resto della rete: <i>Wi-Fi, rete cellulare</i></p>	<p>c'è una stazione base collegata al resto della rete. Tuttavia, un host può dover ritrasmettere (<i>relay</i>) la propria comunicazione attraverso altri nodi wireless per comunicare con la stazione base: <i>alcune reti di sensori e Wi-Fi mesh</i></p>
<i>nessuna infrastruttura</i>	<p>senza stazione base, uno dei nodi può coordinare la trasmissione degli altri: <i>Bluetooth</i></p>	<p>nessuna stazione base, i pacchetti possono dover essere ritrasmessi attraverso diversi nodi wireless prima di giungere a destinazione: <i>mobile ad hoc networks (MANETs) e vehicular ad hoc network (VANET)</i></p>

# Sommario

- Introduzione

## Wireless

- Collegamenti wireless e caratteristiche della rete
- WiFi: 802.11 wireless LAN
- Reti cellulari: 4G e 5G
- Bluetooth



## Mobilità

- Gestione della mobilità: principi
- Gestione della mobilità: pratica
  - reti 4G/5G
  - Mobile IP
- Mobilità: impatto sui protocolli di livello superiore

# Caratteristiche dei collegamenti wireless: attenuazione

- le radiazioni elettromagnetiche si attenuano (attenuation) quando attraversano determinati ostacoli (es., a causa dell'assorbimento e della diffusione)
- anche nello spazio libero l'intensità del segnale si attenua al crescere della distanza percorsa, per effetto della *dispersione* del segnale: attenuazione di spazio libero (*free space path loss*)

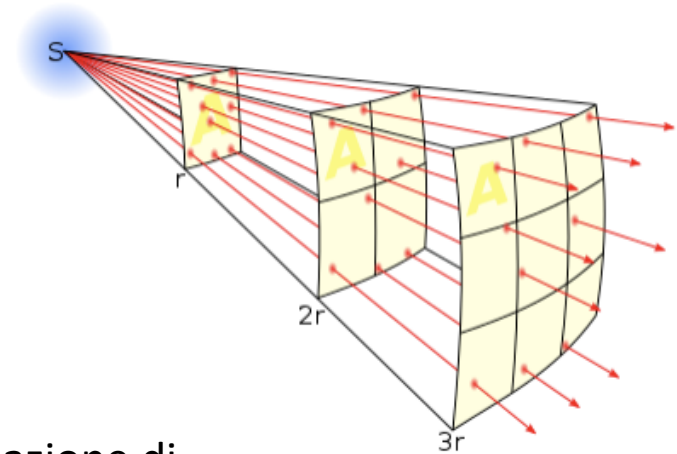
attenuazione di spazio libero  $\sim (fd)^2$

$f$ : frequenza  
 $d$ : distanza

frequenza più alta o  
distanza maggiore



maggiore attenuazione di  
spazio libero



# Caratteristiche dei collegamenti wireless: propagazione su più cammini

**Propagazione su più cammini (multipath propagation):** una parte del segnale si riflette su oggetti e sul terreno, giungendo a destinazione attraverso percorsi di lunghezza differente e quindi arrivando in momenti leggermente differenti.

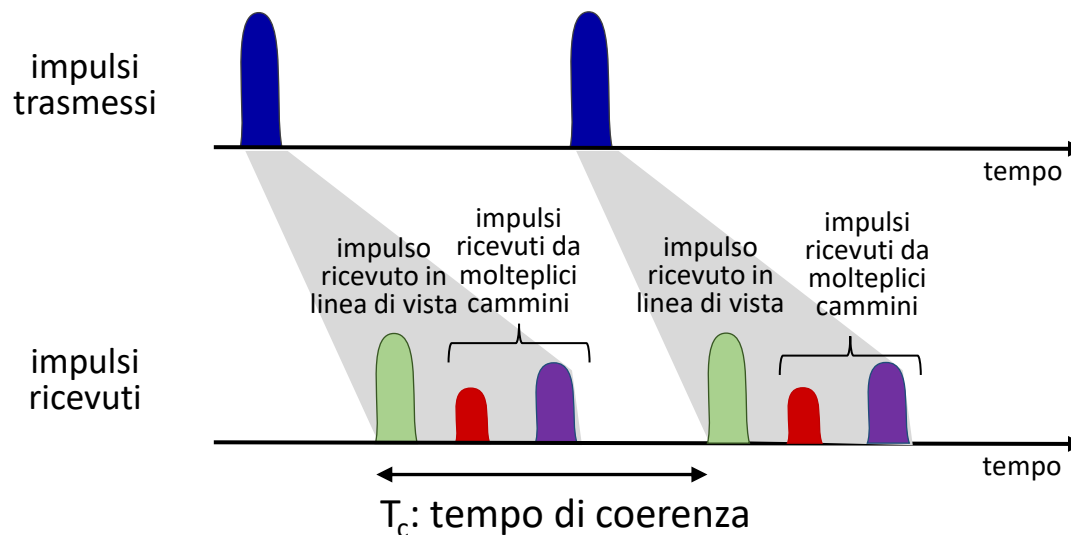


# Caratteristiche dei collegamenti wireless: propagazione su più cammini

**Propagazione su più cammini** (multipath propagation): una parte del segnale si riflette su oggetti e sul terreno, arrivando a destinazione in momenti leggermente diversi

## Tempo di coerenza

- quantità di tempo in cui il bit è presente nel canale per essere ricevuto
- influenza la massima velocità di trasmissione possibile, poiché i tempi di coerenza non possono sovrapporsi



# Caratteristiche dei collegamenti wireless: interferenze da parte di altre sorgenti

- frequenze wireless standard (es. 2,4 GHz usata da Wi-Fi e Bluetooth) condivise da altri dispositivi (es. telefoni cordless)
- rumore elettromagnetico ambientale (es. prodotto da motori, forni a microonde)
- per evitare queste interferenze, standard 802.11 recenti usando banda 5 GHz



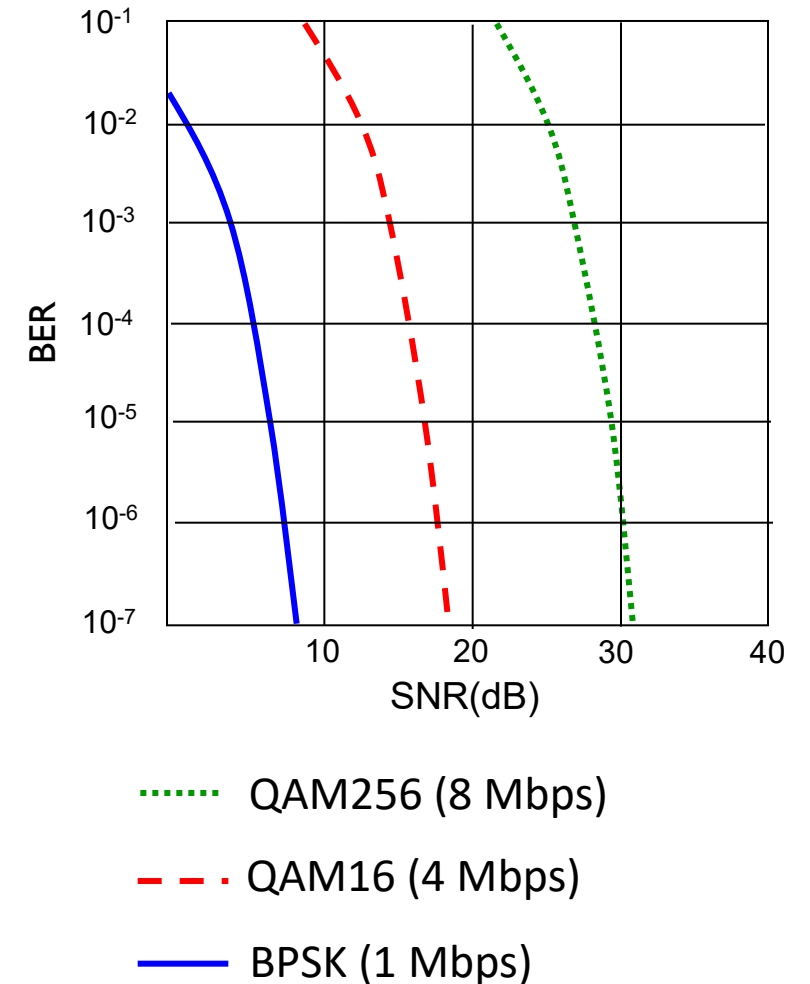
# Caratteristiche dei collegamenti wireless: interferenze da parte di altre sorgenti

- **rapporto segnale-rumore (signal-to-noise ratio, SNR)**
  - un SNR più grande facilita il ricevente nell'estrazione del segnale trasmesso (ma ricevuto degradato per l'attenuazione e i cammini molteplici) dal rumore di fondo
- **tasso di errore sui bit (Bit error rate, BER)**
  - semplificando: probabilità che un bit sia ricevuto in errore

# Caratteristiche dei collegamenti wireless: interferenze da parte di altre sorgenti

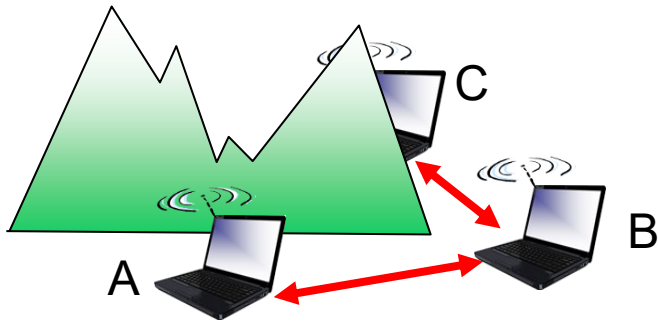
## ■ Bilanciamento di SNR e BER

- *per un dato schema di modulazione:*  
aumentare la potenza -> aumentare lo SRN  
-> diminuisce il BER
- trasmissioni a potenza maggiore implicano un maggiore consumo di energia (critico per dispositivi a batteria) e possono andare a interferire con altre trasmissioni
- per un dato SNR, una tecnica di modulazione con più elevato tasso di trasmissione dei bit avrà un BER più alto
- lo SNR può cambiare con la mobilità:  
adattare dinamicamente il livello fisico  
(tecnica di modulazione, tasso di trasmissione)



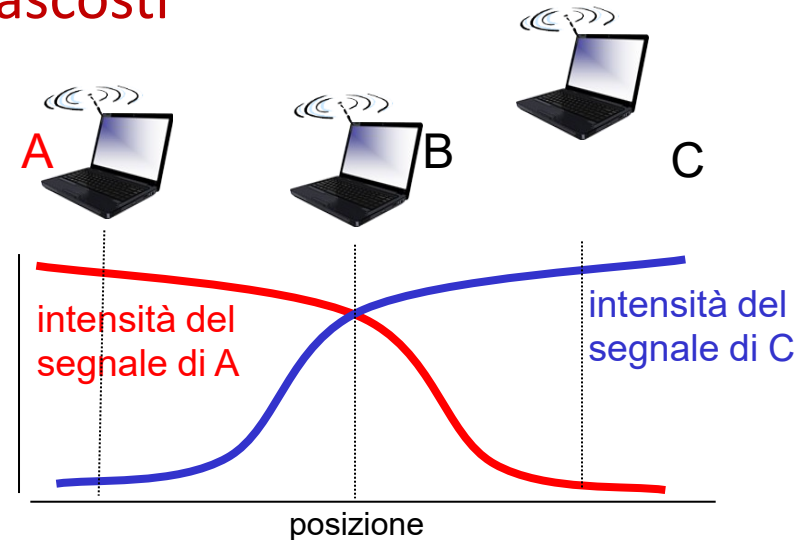
# Caratteristiche dei collegamenti wireless: terminali nascosti

## Problema del terminale nascosto



- B, A possono comunicare
- B, C possono comunicare
- A, C non possono comunicare tra loro ma possono causare (senza saperlo!) interferenza presso la destinazione B

## Anche l'attenuazione causa "terminali nascosti"



- B, A possono comunicare
- B, C possono comunicare
- A, C non possono comunicare ma causano interferenza presso B

# Sommario

- Introduzione

## Wireless

- Collegamenti wireless e caratteristiche della rete
- **WiFi: 802.11 wireless LAN**
- Reti cellulari: 4G e 5G
- Bluetooth



## Mobilità

- Gestione della mobilità: principi
- Gestione della mobilità: pratica
  - reti 4G/5G
  - Mobile IP
- Mobilità: impatto sui protocolli di livello superiore

# Accesso multiplo a divisione di codice (Code Division Multiple Access, CDMA)

- Un "codice" unico viene assegnato a ciascun utente (*code set partitioning*)
  - tutti gli utenti condividono la stessa frequenza, ma ciascun utente ha una propria sequenza "chipping" (cioè il "codice") per codificare i dati
  - consente a più utenti di "coesistere" e trasmettere simultaneamente con un'interferenza minima (se i codici sono "ortogonali", cioè con prodotto scalare nullo, ovvero  $\vec{c}^1 \cdot \vec{c}^2 = 0$ )

Tratteremo CDMA in maniera "semplificata", facendo una serie di assunzioni:

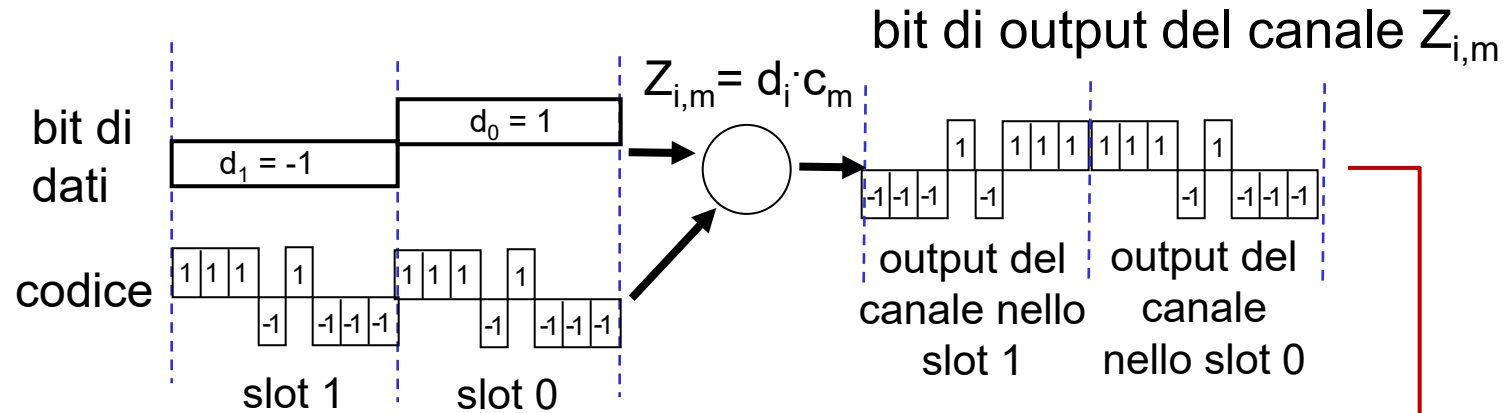
- rappresentare i bit 0 e 1 rispettivamente con i valori -1 e +1
- segnali provenienti dai diversi mittenti ricevuti con la stessa intensità
- sincronizzazione

Sotto queste assunzioni:

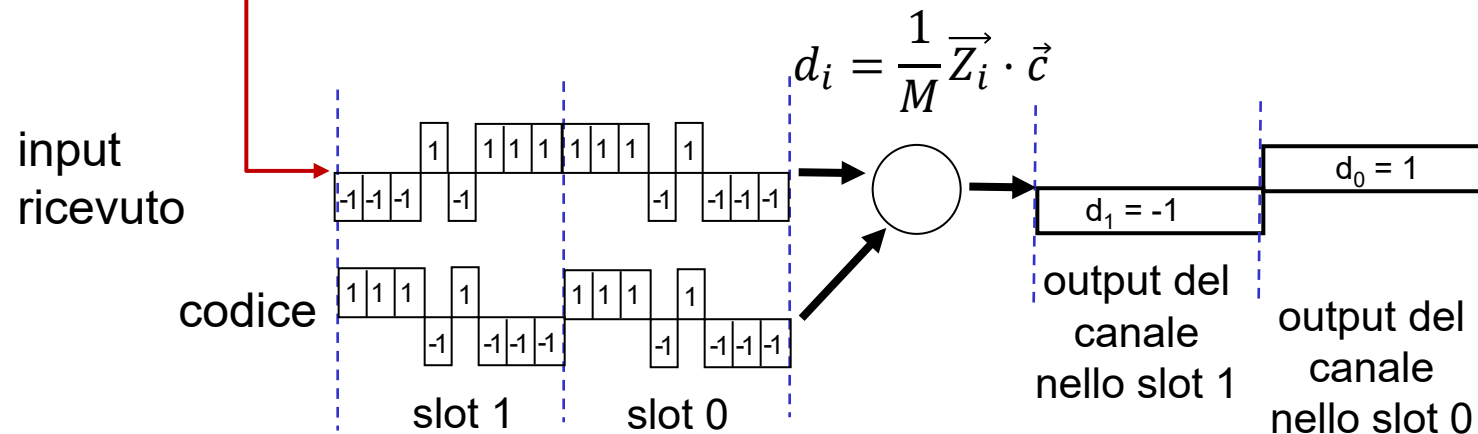
- **codifica:** il bit di dati  $d_i$  viene codificato come  $d_i \vec{c}$ : un singolo bit di dati viene codificato con M bit quanto è lungo il codice. Pertanto, il segnale codificato ha un tasso maggiore del segnale di dati originale.
- **decodifica:** raggruppa i bit ricevuti a M a M, quindi calcola il prodotto scalare tra ciascun gruppo e il codice del mittente di interesse, successivamente diviso per M

# CDMA codifica/decodifica

trasmittente



ricevente

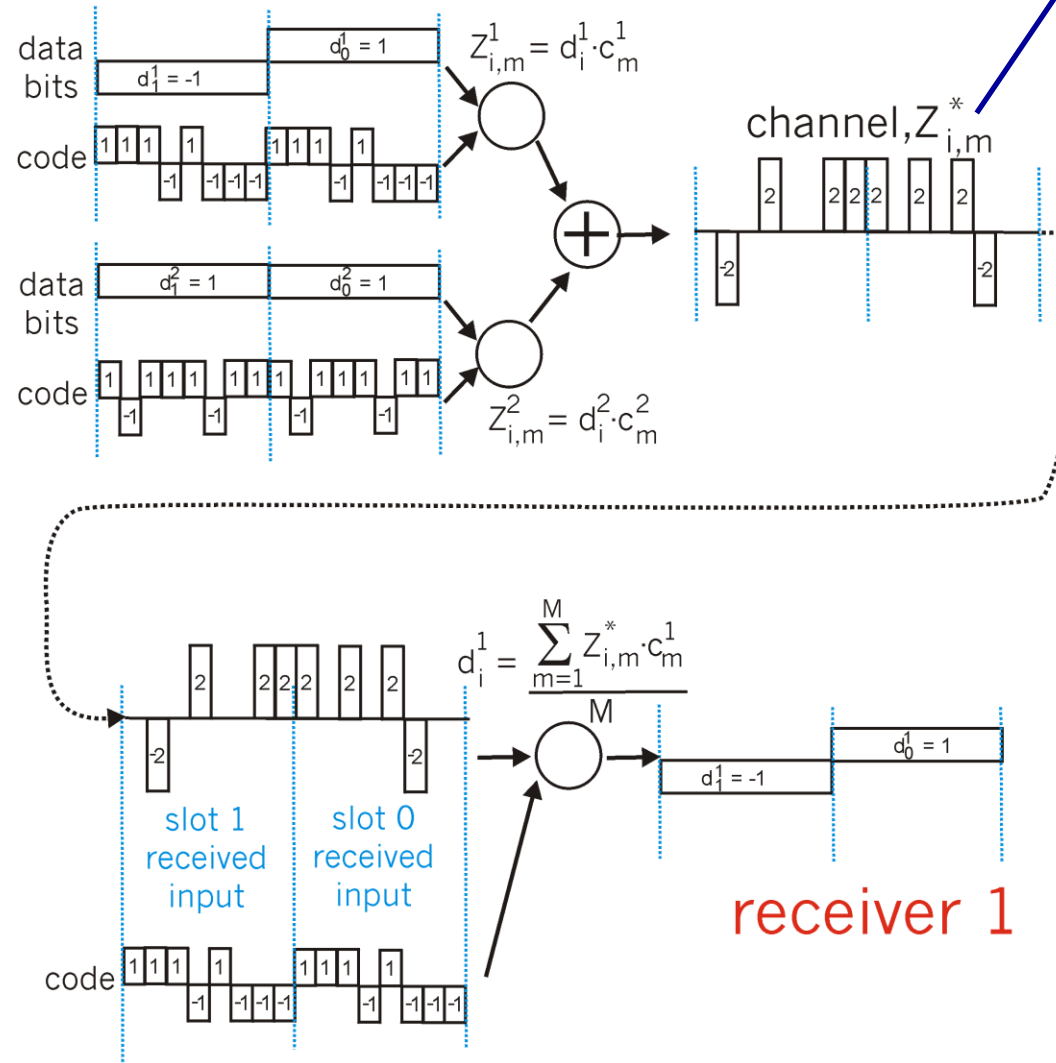


... cosa accade se due nodi trasmettono simultaneamente?

# CDMA: due trasmittenti

trasmittente 1

trasmittente 2



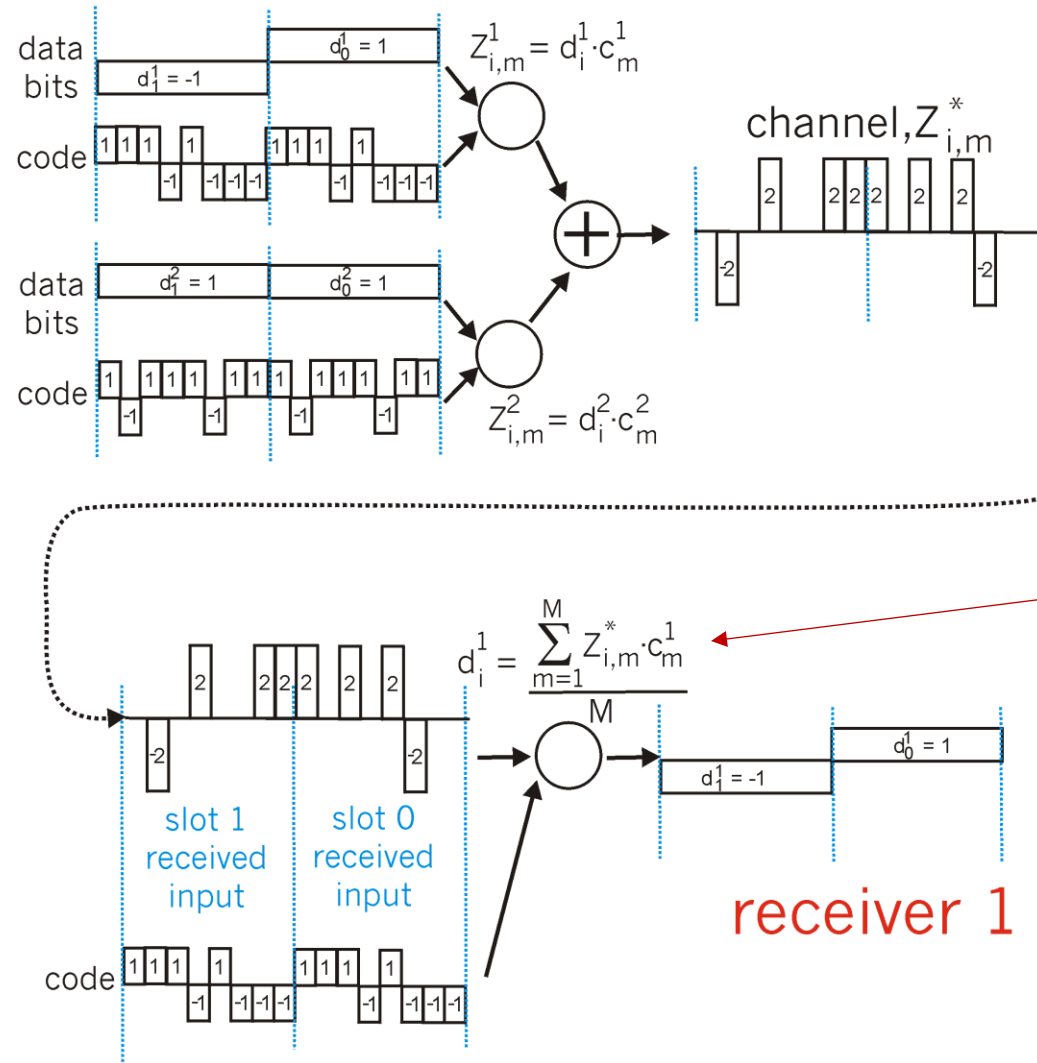
interferenza additiva tra i due segnali trasmessi

usando lo stesso codice del trasmittente 1, il ricevitore recupera i dati originali del mittente 1 dai dati sommati del canale!

# CDMA: due trasmittenti

trasmittente 1

trasmittente 2



Perché funziona?

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{M} \overrightarrow{Z_i^*} \cdot \overrightarrow{c^1} \\
 &= \frac{1}{M} \left( \left( (d_i^1 \cdot \overrightarrow{c^1}) + (d_i^2 \cdot \overrightarrow{c^2}) \right) \cdot \overrightarrow{c^1} \right) \\
 &= \frac{1}{M} \left( (d_i^1 \cdot \overrightarrow{c^1}) \cdot \overrightarrow{c^1} + (d_i^2 \cdot \overrightarrow{c^2}) \cdot \overrightarrow{c^1} \right) \\
 &= \frac{1}{M} \left( d_i^1 \cdot (\overrightarrow{c^1} \cdot \overrightarrow{c^1}) + d_i^2 \cdot (\overrightarrow{c^2} \cdot \overrightarrow{c^1}) \right) \\
 &= \frac{1}{M} (d_i^1 M + d_i^2 0) = d_i^1
 \end{aligned}$$



# Sommario

- Introduzione

## Wireless

- Collegamenti wireless e caratteristiche della rete
- **WiFi: 802.11 wireless LAN**
- Reti cellulari: 4G e 5G
- Bluetooth



## Mobilità

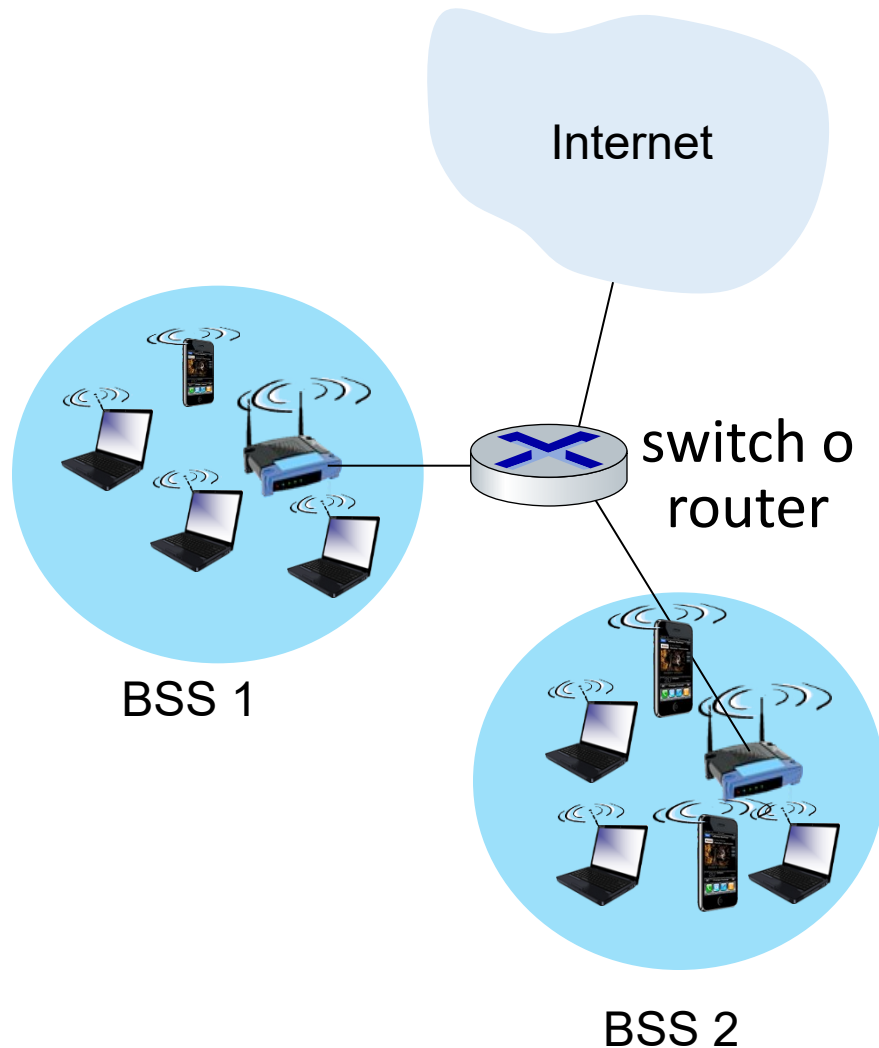
- Gestione della mobilità: principi
- Gestione della mobilità: pratica
  - reti 4G/5G
  - Mobile IP
- Mobilità: impatto sui protocolli di livello superiore

# IEEE 802.11 Wireless LAN

IEEE 802.11 standard	Anno	Max data rate	Raggio	Frequenza
802.11b	1999	11 Mbps	30 m	2.4 GHz
802.11g	2003	54 Mbps	30m	2.4 GHz
802.11n (WiFi 4)	2009	600 Mbps	70m	2.4, 5 GHz
802.11ac (WiFi 5)	2013	3.47Gpbs	70m	5 GHz
802.11ax (WiFi 6)	2020 (exp.)	14 Gbps	70m	2.4, 5 GHz
802.11af	2014	35 – 560 Mbps	1 Km	Bande televisive inutilizzate (54-790 MHz)
802.11ah	2017	347Mbps	1 Km	900 MHz

- Tutti usano CSMA/CA per l'accesso multiplo ed hanno versioni con stazione base e rete ad hoc

# Architettura delle LAN 802.11

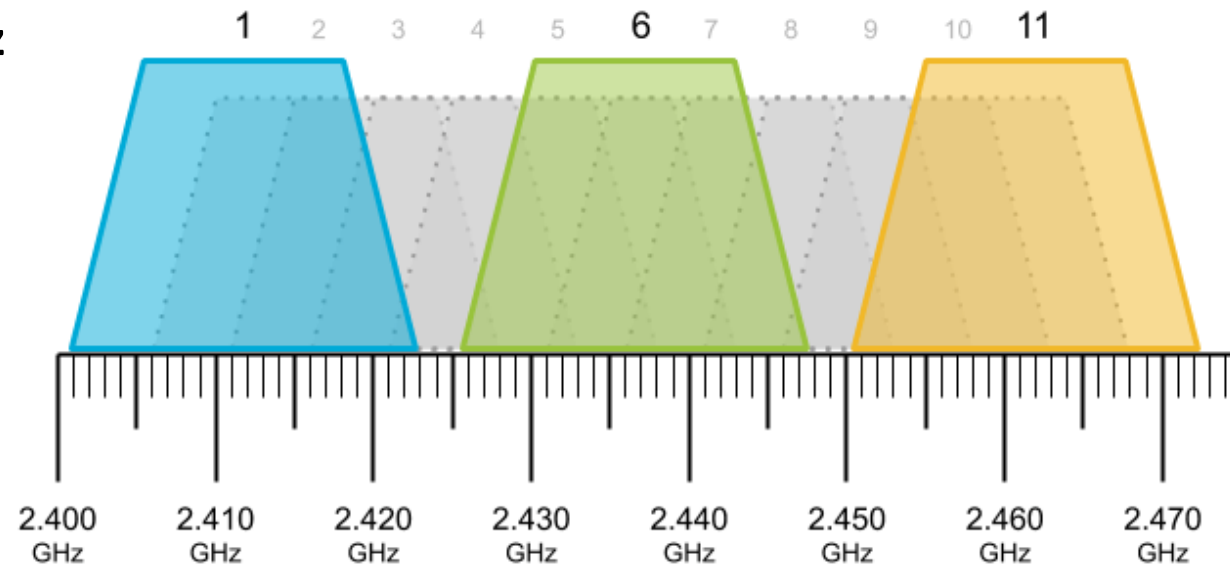


- Gli host wireless comunicano con la stazione base
  - stazione base = punto di accesso, access point (AP)
- Basic Service Set (BSS) (detto anche “cella”) in modalità infrastruttura contiene:
  - host wireless
  - punto di accesso (AP): stazione base
  - modalità ad hoc: solo host

# 802.11: Canali

- spettro **diviso in canali** a frequenze differenti
  - AP admin sceglie le frequenze per il punto di accesso
  - possibili interferenze: il canale può essere lo stesso scelto dall'AP vicino!

## Esempio: 2.4 GHz



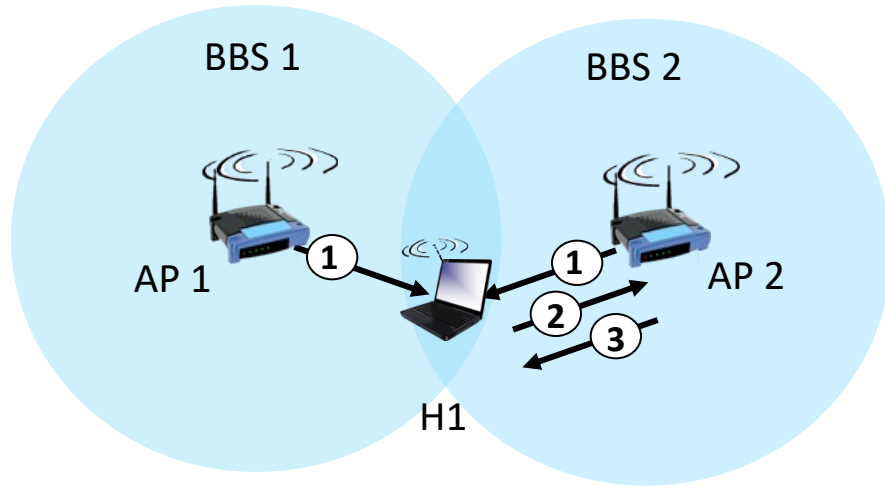
- Canali non sovrapposti: separati da 4 o più canali
- Ne esistono 3
- Possibilità di installare 3 AP nello stesso posto per avere un tasso aggregato pari al triplo del tasso di trasmissione nominale

# 802.11: Associazione

- host in arrivo: deve essere **associato** con un AP
  - scansiona i canali, in ascolto per i *frame beacon* inviati periodicamente dall'AP e contenenti il nome dell'AP (SSID) e l'indirizzo MAC
  - sceglie l'AP con cui associarsi
  - può autenticarsi
  - quindi tipicamente invia un messaggio di richiesta DHCP nella sottorete attraverso l'AP per ottenere un indirizzo IP nella sottorete

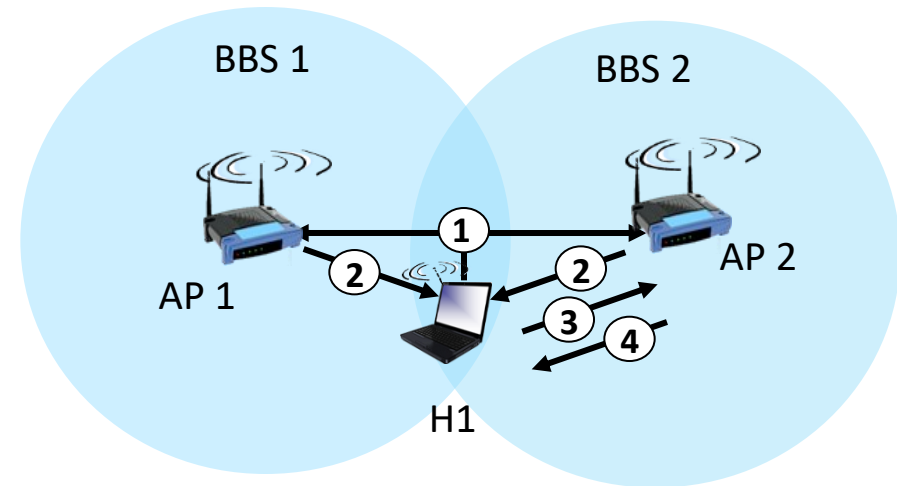


# 802.11: scansione passiva e attiva



## scansione passiva:

- (1) frame beacon inviati dagli AP
- (2) invio di un frame di richiesta di associazione da H1 all'AP selezionato
- (3) invio di un frame di risposta di associazione dall'AP selezionato a H1

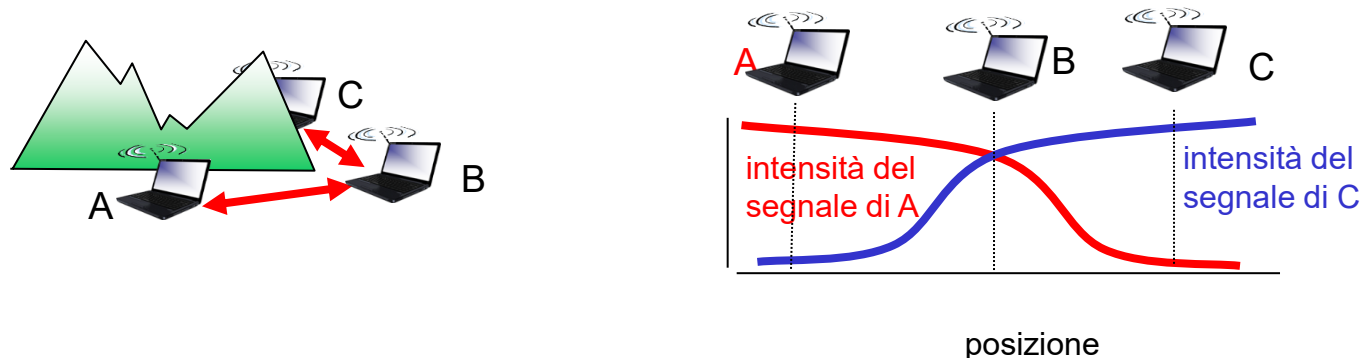


## scansione attiva:

- (1) frame sonda di richiesta inviato in broadcast da H1
- (2) frame sonda di risposta inviato dagli AP
- (3) invio di un frame di richiesta di associazione da H1 all'AP selezionato
- (4) invio di un frame di risposta di associazione dall'AP selezionato a H1

# IEEE 802.11: accesso multiplo

- evitare collisioni: 2<sup>+</sup> nodi che trasmettono simultaneamente
- 802.11: CSMA – ascolta il canale prima di trasmettere
  - non si verifica una collisione con la trasmissione rilevata di un altro nodo in corso
- 802.11: *non* rileva le collisioni!
  - difficile rilevare le collisioni: intensità del segnale trasmesso, debolezza del segnale ricevuto a causa dell'attenuazione
  - in ogni caso, non potrebbe rilevare tutte le collisioni: terminale nascosto, attenuazione
  - obiettivo: *evitare le collisioni*: CSMA/CollisionAvoidance



# IEEE 802.11 Protocollo MAC: CSMA/CA

**802.11 mittente** fisicamente o in modo virtuale usando i valori di duration (vedi dopo)

1 se **percepisce il canale inattivo** per **DIFS** (Distributed Inter-frame Space) **allora**

trasmette il frame per intero (no CD)

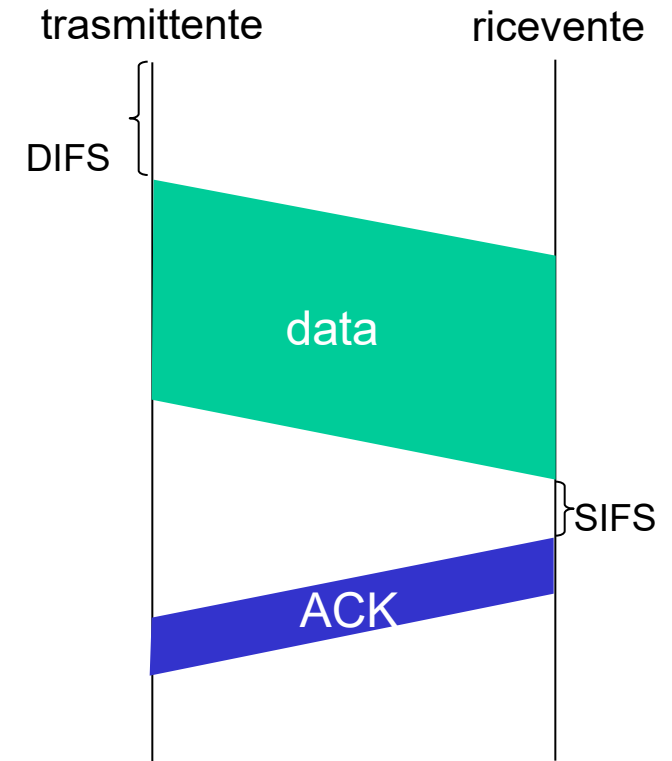
2 **altrimenti**, la trasmissione deve essere differita

- sceglie un valore di ritardo casuale, usando *binary exponential backoff*
- finché il timer non è zero:
  - aspetta che il canale sia libero per DIFS
  - decrementa il timer, al termine di uno slot in cui il canale è libero
- quando il timer raggiunge zero (può accadere solo se il canale è libero), trasmette il frame per intero
- se non riceve un ACK, incrementa l'intervallo di backoff, ripete il punto 2
- se riceve un ACK e ha altri dati da trasmettere\*, resetta l'intervallo di backoff e ripete il punto 2

**802.11 destinatario**

se il frame ricevuto è OK

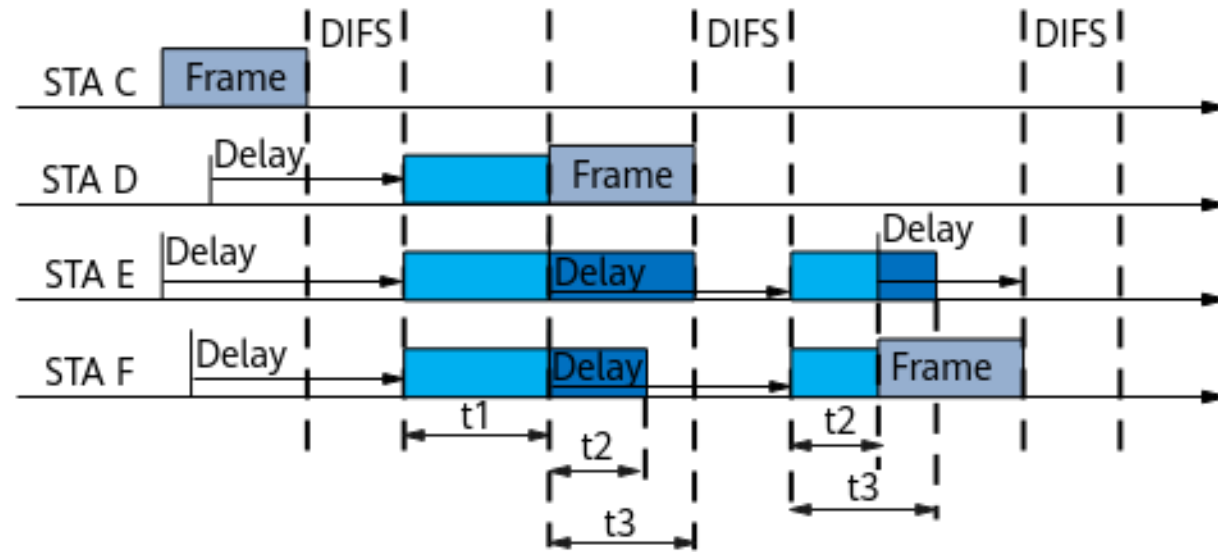
invia un ACK (necessario a causa del problema del terminale nascosto) dopo **SIFS** (Short Inter-frame Spacing)



\* può trasmettere una raffica di frammenti ciascuno dopo SIFS (entro un certo limite)



# IEEE 802.11 Protocollo MAC: CSMA/CA



- Frame : Data frame to be transmitted by a STA
- Passing backoff time
- Remaining backoff time

Fonte: <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100410096/25772fc2>

# IEEE 802.11 Protocollo MAC: CSMA/CA

Si supponga che due nodi abbiano frame da trasmettere, ma che entrambi percepiscano il canale occupato dalla trasmissione di un terzo nodo.

In CSMA/CD, i due nodi iniziano a trasmettere non appena percepiscono il canale libero, collidendo...ma il rilevamento delle collisioni interromperebbe presto entrambe le trasmissioni, riducendo lo spreco.

Quando non è possibile implementare il rilevamento delle collisioni, CSMA/CA cerca di evitarle: pertanto, i due nodi entrano in un processo di attesa casuale, che permette a uno dei due nodi iniziare a trasmettere, dando tempo all'altro di rilevarne il segnale e, quindi, congelare il proprio timer (in attesa che il canale diventi nuovamente libero).

Putroppo, le collisioni sono ancora possibili:

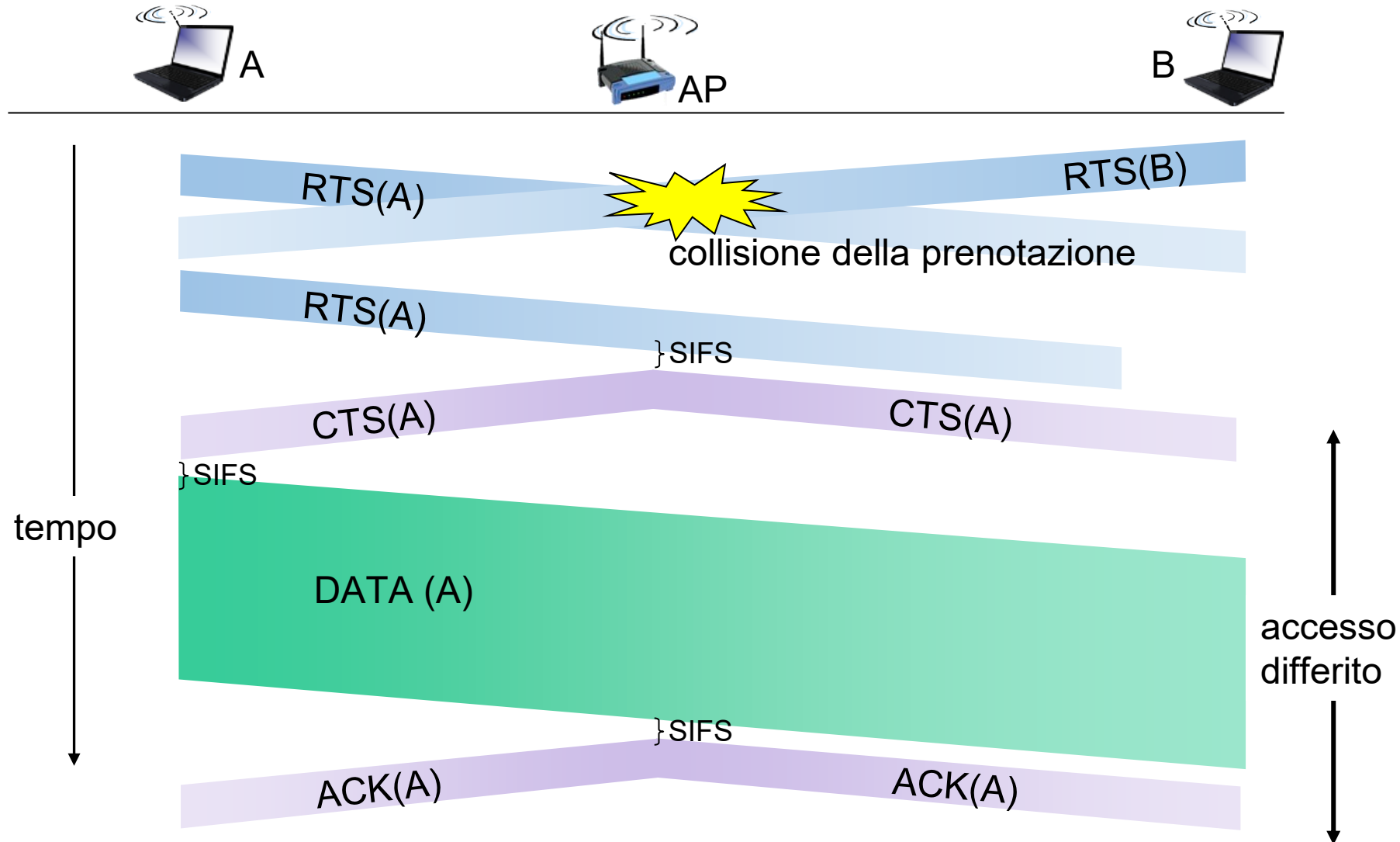
- terminale nascosto
- i tempi di attesa scelti dai due nodi sono sufficientemente vicini, per cui il segnale dell'uno non raggiunge l'altro nodo quando questo inizia a trasmettere perché anche il proprio timer si è azzerato

# Evitare le collisioni (di più)

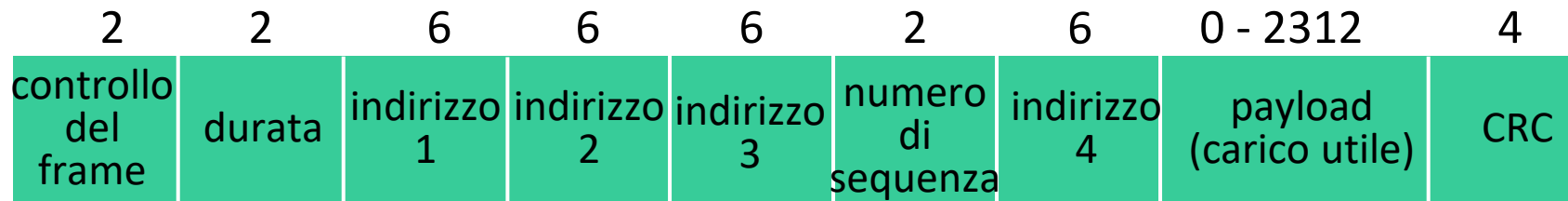
**idea:** consentire al mittente di "prenotare" il canale: si evitano così le collisioni anche durante l'invio di lunghi pacchetti di dati (opzionale, non viene sempre usato)

- il mittente invia prima un *piccolo* pacchetto request-to-send (RTS) all'AP usando CSMA
  - possono verificarsi collisioni tra i pacchetti RTS (ma sono comunque molto piccoli)
- AP risponde (dopo un SIFS) diffondendo in broadcast il pacchetto clear-to-send CTS in risposta al pacchetto ricevuto
- Il pacchetto CTS è ricevuto da tutti i nodi
  - il mittente invierà (dopo un SIFS) il pacchetto
  - gli altri nodi rimanderanno eventuali trasmissioni

# Evitare le collisioni: scambio di pacchetti RTS-CTS



# 802.11 frame: indirizzamento



**Indirizzo 1:** indirizzo MAC dell'host wireless o AP che deve ricevere il frame (può non essere il destinatario finale)

**Indirizzo 2:** indirizzo MAC dell'host wireless o AP che trasmette il pacchetto (può non essere il mittente iniziale)

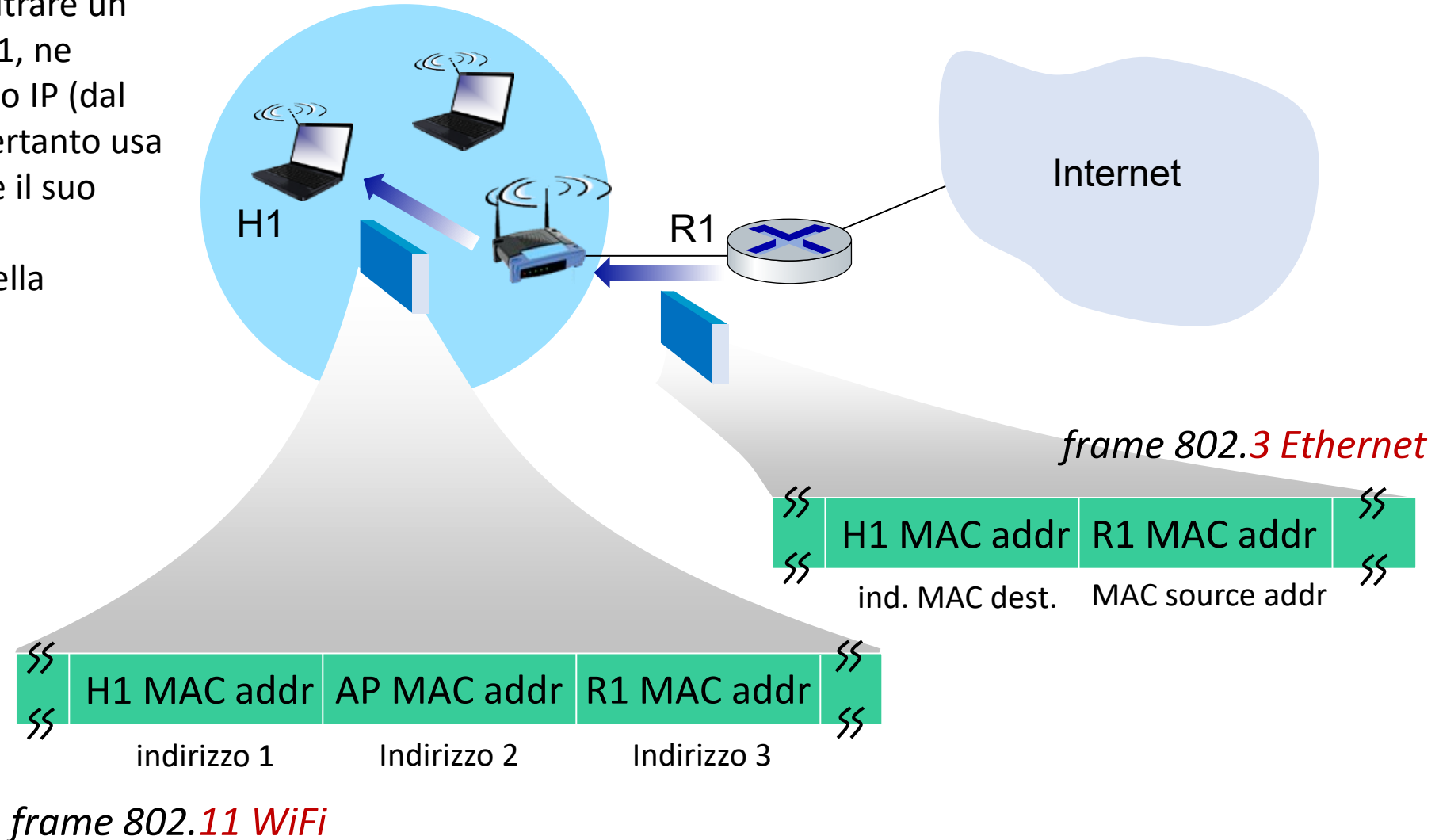
**Indirizzo 3:** indirizzo MAC dell'interfaccia router cui l'AP è collegato

Indirizzo 3 gioca un ruolo cruciale nell'internetworking tra un BSS e una LAN cablata

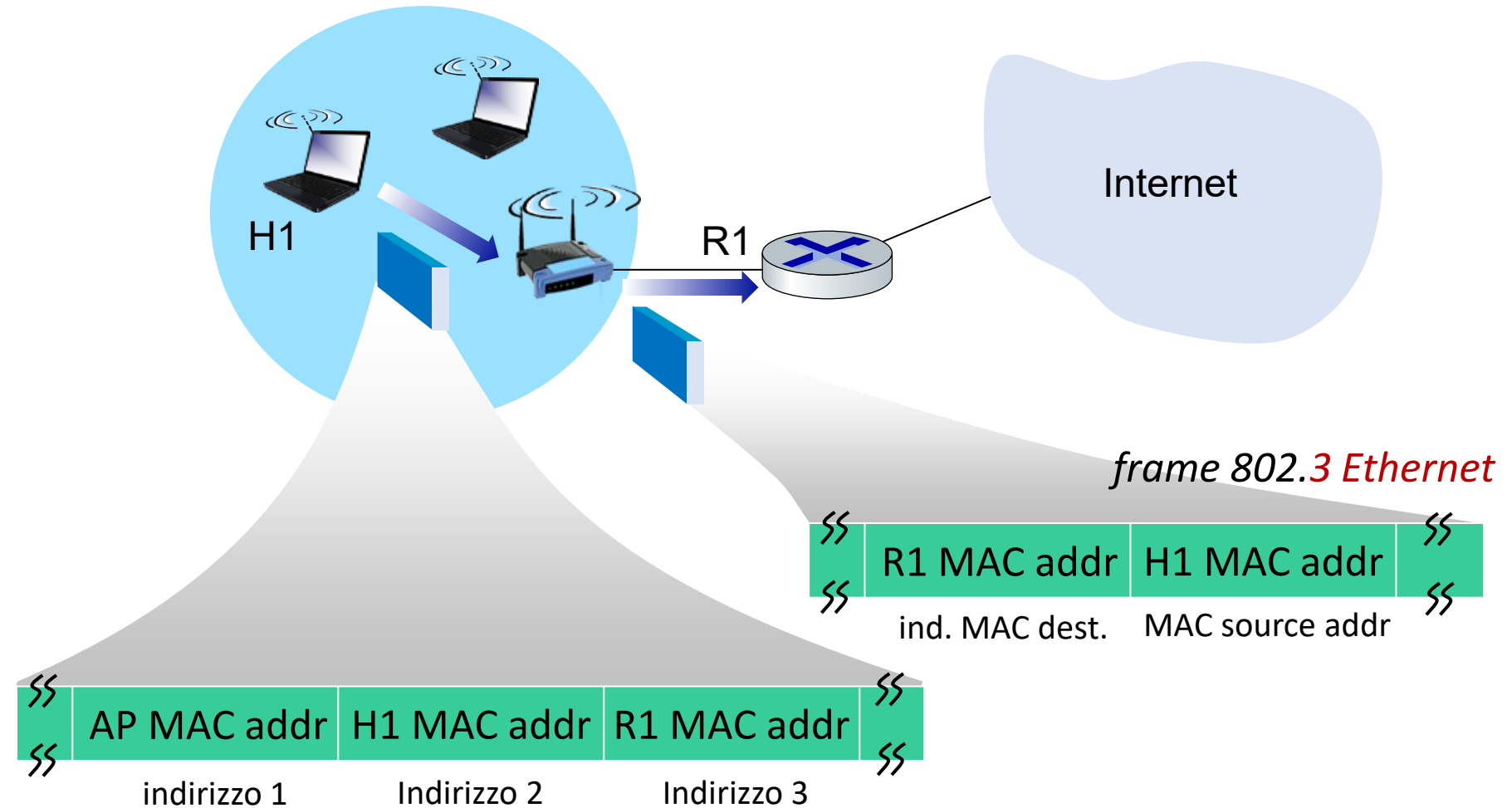
**Indirizzo 4:** usato solo in modalità ad hoc

# 802.11 frame: indirizzamento

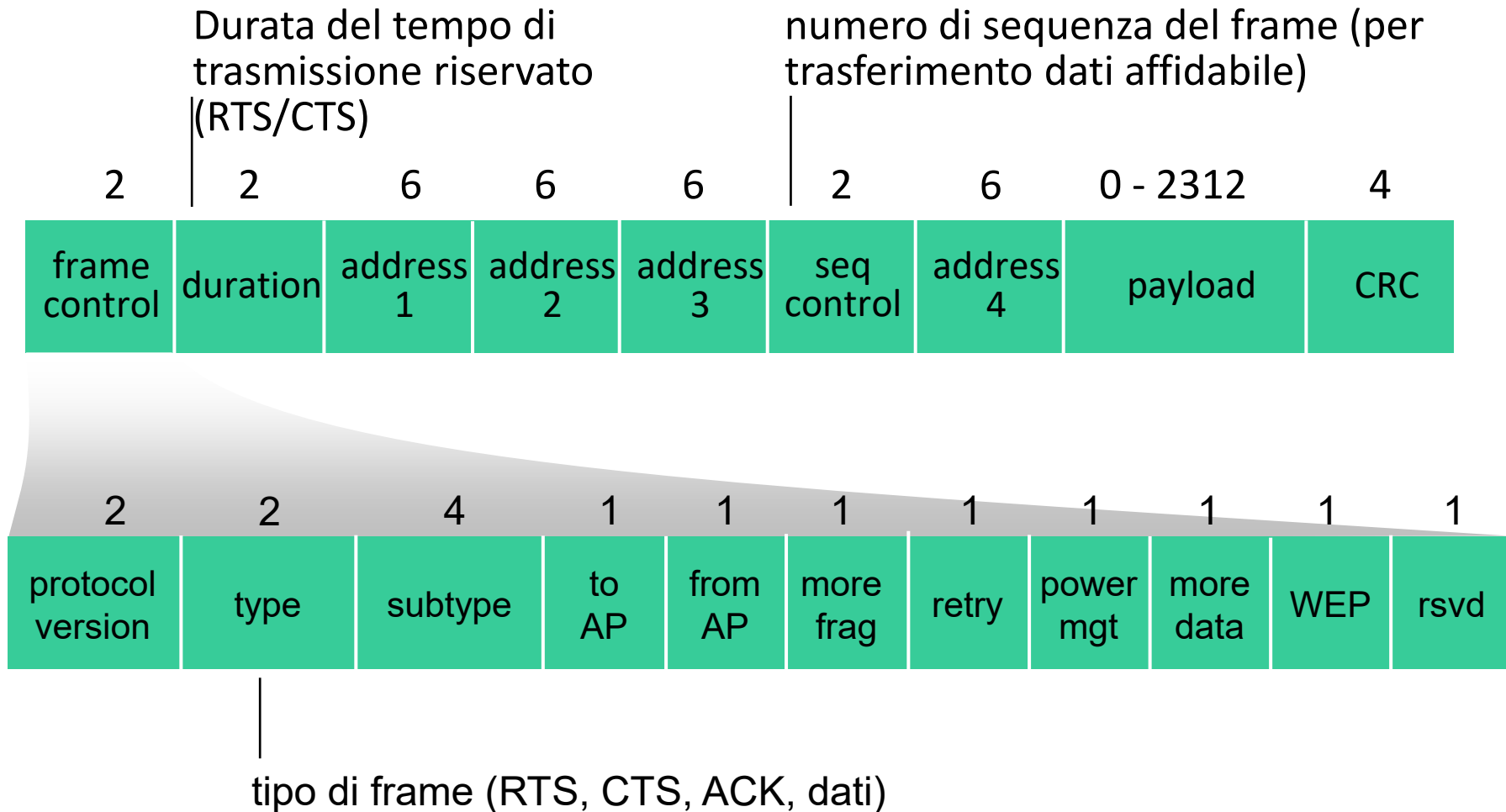
R1, che deve inoltrare un datagramma a H1, ne conosce l'indirizzo IP (dal datagramma), pertanto usa ARP per ottenere il suo MAC address: inconsapevole della presenza dell'AP



# 802.11 frame: indirizzamento



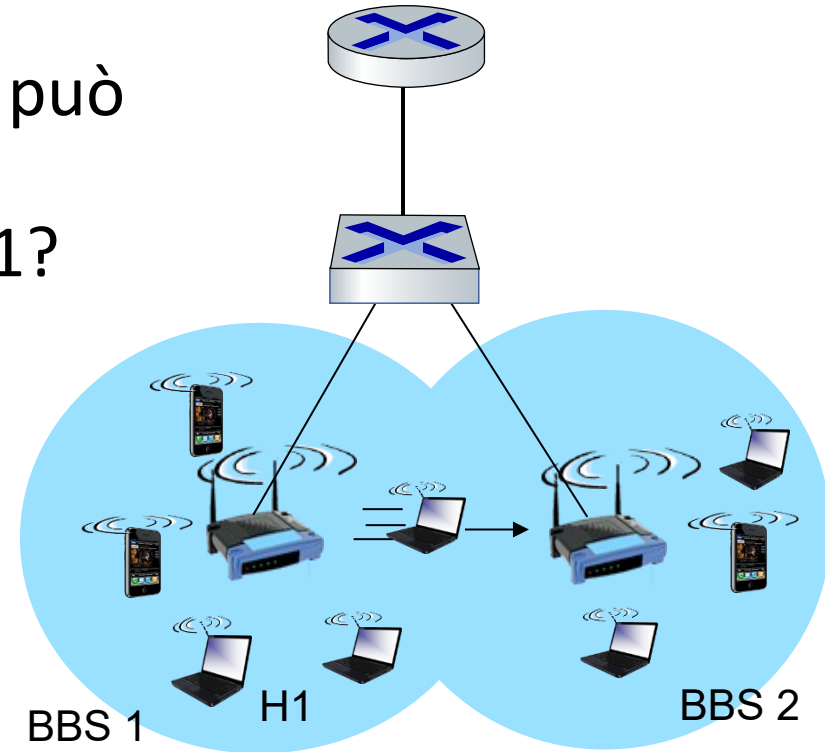
# 802.11 frame: indirizzamento





# 802.11: mobilità all'interno della stessa sottorete

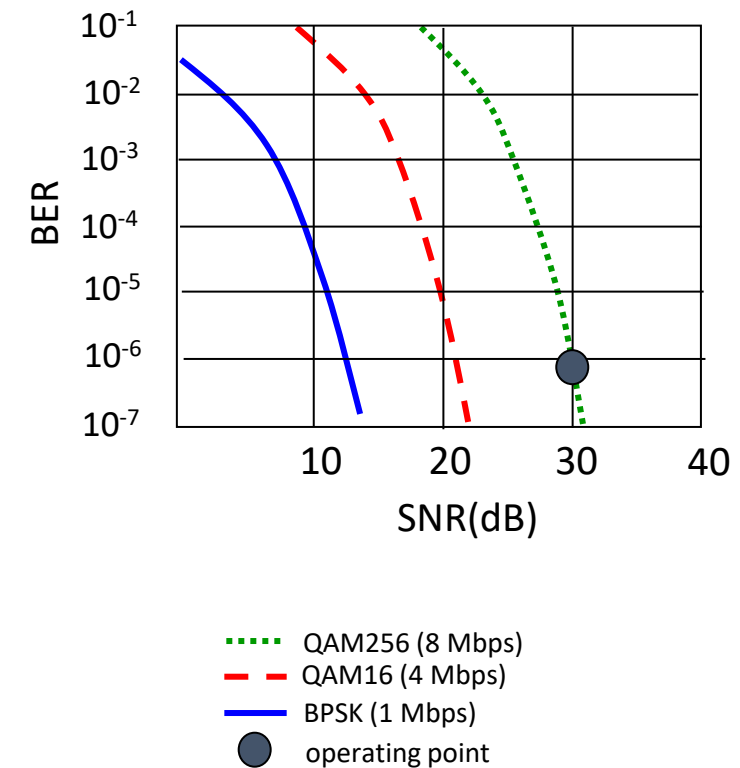
- siccome i due AP sono connessi da uno switch (anziché da un router), H1 rimane nella stessa sottorete: l'indirizzo IP può rimanere lo stesso
- switch: con quale AP è associato H1?
  - auto-apprendimento: lo switch vedrà frame da H1 e “ricorderà” quale porta può essere usata per raggiungere H1
  - Il nuovo AP può inviare un frame Ethernet broadcast con mittente H1, affinché lo switch apprenda la nuova porta per raggiungere H1
  - Lo standard 802.11f definisce un protocollo inter-AP che affronta questo e altri problemi



# 802.11: funzionalità avanzate

## Adattamento del tasso trasmissivo

- La stazione base e la stazione mobile cambiano dinamicamente il tasso trasmissivo (tecnica di modulazione a livello fisico) come la stazione mobile si sposta e di conseguenza cambia l'SNR
  1. SNR cala BER aumenta quando il nodo si allontana dalla stazione base
  2. Quando il BER diventa troppo alto, passa un tasso trasmissivo inferiore ma con BER inferiore



# 802.11: funzionalità avanzate

## Gestione dell'energia

- Nodo ad AP: “Sto per diventare inattivo fino al prossimo frame beacon”
  - AP sa che non deve trasmettere frame a questo nodo
  - il nodo si riattiva prima del successivo frame beacon
- frame beacon: contiene la lista dei nodi che devono ricevere frame in attesa sull'AP
  - il nodo rimane sveglio se devono essere inviati frame da AP a mobile; altrimenti dorme di nuovo fino al prossimo frame beacon