

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

Sistemi Operativi e Reti  
(modulo Reti)  
a.a. 2023/2024

# Wireless e Reti Mobili (parte2)

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)

# Sommario

- Introduzione

## Wireless

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

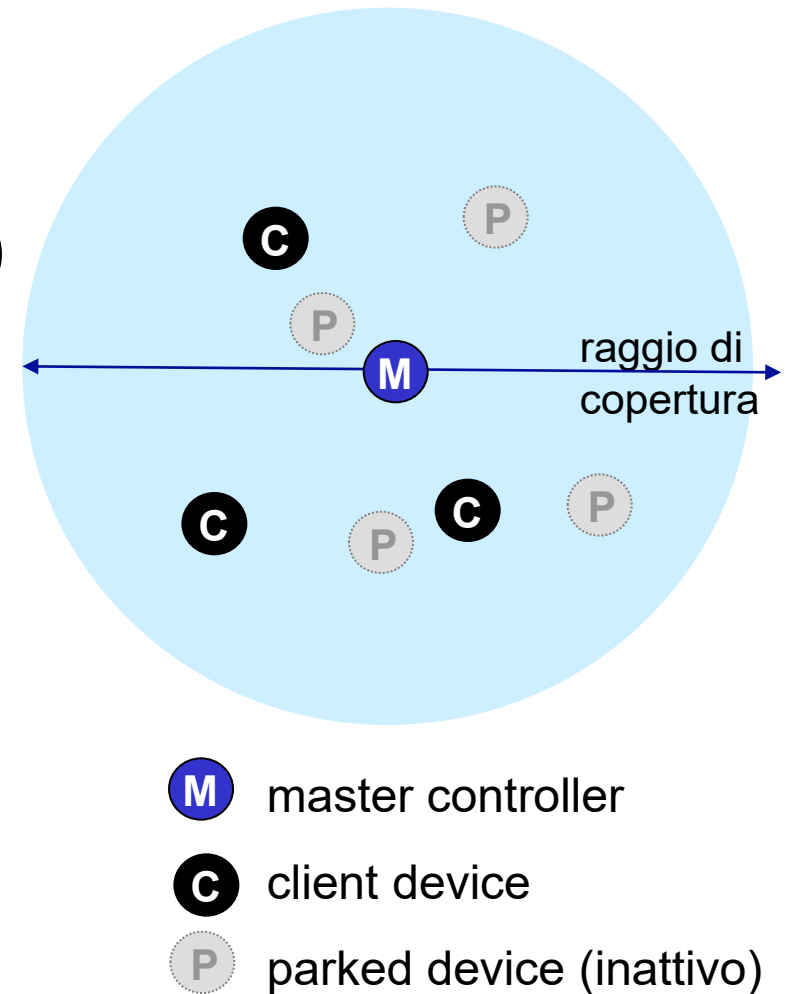


## Mobilità

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

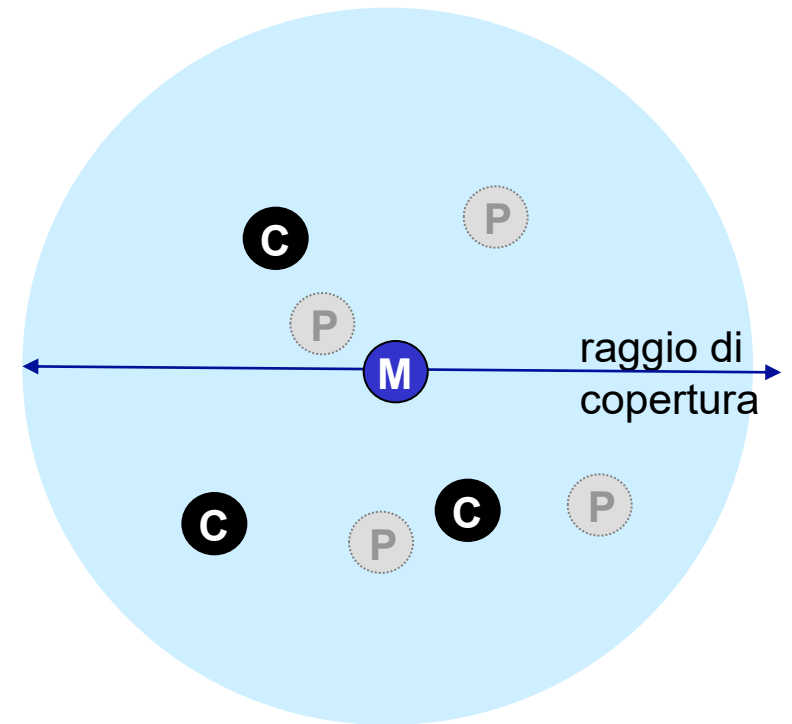
# Bluetooth: Personal area network

- meno di 10 m di diametro
- sostituzione dei cavi (mouse, tastiera, cuffie)
- *wireless personal area network* (WPAN) [connette dispositivi nell'area di lavoro di una persona] o *piconet*
- 2.4-2.5 GHz ISM radio band, fino a 3 Mbps: essendo usata da molti altri dispositivi, Bluetooth deve tenere in particolare considerazione le interferenze



# Bluetooth: Personal area network

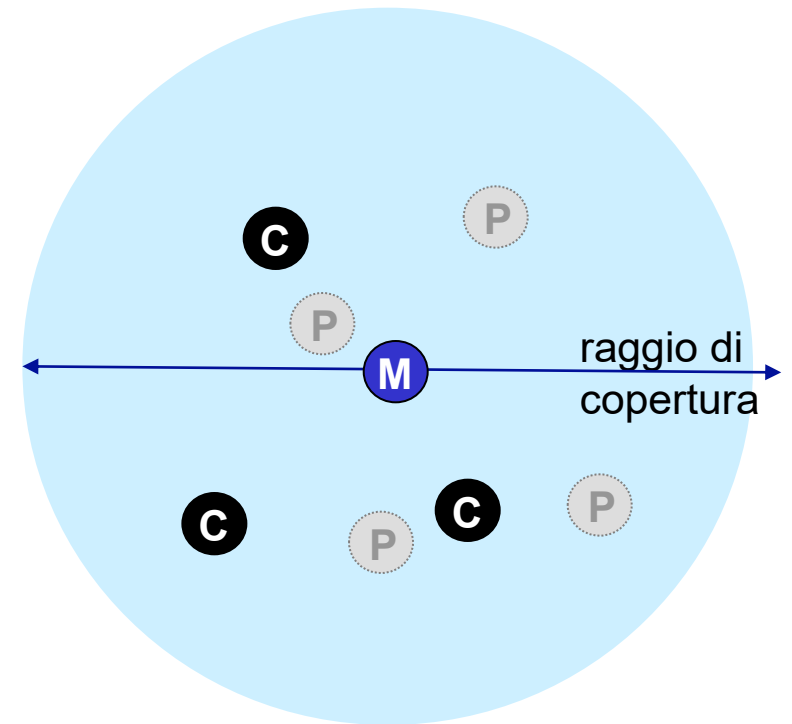
- TDM, slot di 625  $\mu\text{sec}$
- FDM: il mittente usa 79 canali di frequenza in un ordine conosciuto, pseudo-casuale da slot a slot (*frequency-hopping spread spectrum*, FHSS)
  - altri dispositivi/apparecchiature non nella piconet interferiscono solo in alcuni slot



- M** master controller
- C** client device
- P** parked device (inattivo)

# Bluetooth: Personal area network

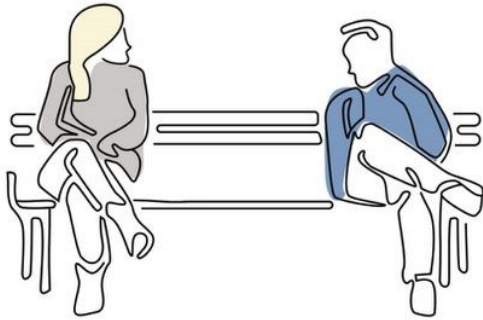
- ad hoc: nessuna infrastruttura
- fino a 8 dispositivi attivi: un master e dispositivi client:
  - il master stabilisce il "clock", decide la sequenza dei salti tra le frequenze, controlla la potenza di trasmissione, esegue il polling dei client
- **parked mode** (fino a 255): i client possono “andare a dormire” (park) e risvegliarsi successivamente (per preservare la batteria)
- **bootstrapping**: i nodi si autoassemblano (plug and play) in una piconet
  - **neighbor discovery**: il master invia (ripetutamente) messaggi *inquiry* in broadcast su ciascun canale di frequenza, cui i dispositivi (in ascolto su un determinato canale) rispondono dopo un ritardo casuale (per evitare collisioni)
  - **paging**: il master manda a ciascun singolo dispositivo un invito: quando riceve un ACK, il master invia al dispositivo del pattern per il frequency hopping, il clock e un indirizzo



- M** master controller
- C** client device
- P** parked device (inattivo)

# Pandemia + Bluetooth

Alice and Bob meet each other for the first time and have a 10-minute conversation.

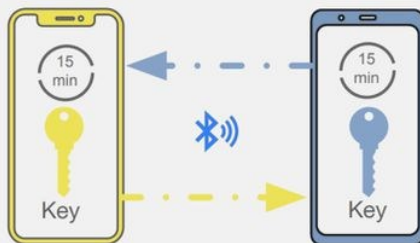


Bob is positively diagnosed for COVID-19 and enters the test result in an app from a public health authority.



A few days later...

Their phones exchange anonymous identifier beacons (which change frequently).



With Bob's consent, his phone uploads the last 14 days of keys for his broadcast beacons to the cloud.



# Pandemia + Bluetooth

Alice continues her day unaware she had been near a potentially contagious person.

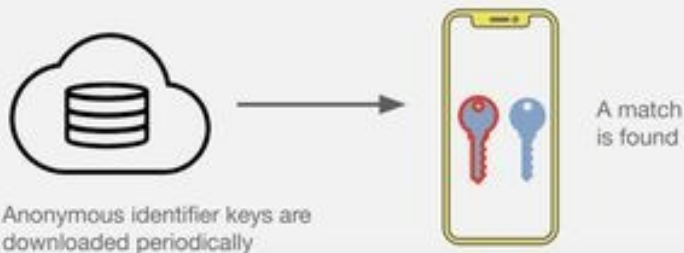


Alice sees a notification on her phone.

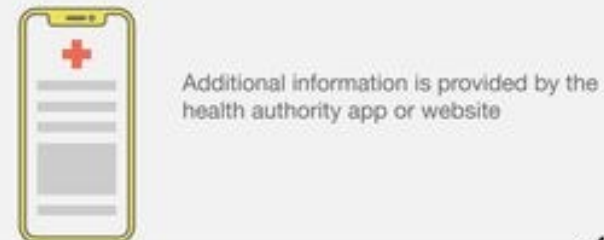


Sometime later...

Alice's phone periodically downloads the broadcast beacon keys of everyone who has tested positive for COVID-19 in her region. A match is found with the Bob's anonymous identifier beacons.



Alice's phone receives a notification with information about what to do next.





# 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



# Reti cellulari 4G/5G

- *la* soluzione per Internet mobile in wide-area
- dispiegamento/uso diffuso:
  - Più dispositivi mobili che fissi connessi alla banda larga (5 a 1 nel 2019)!
  - Disponibilità del 4G: 97% del tempo in Korea (90% negli US)
- tassi di trasmissione fino a centinaia di Mbps
- standard tecnici: 3rd Generation Partnership Project (3GPP)
  - [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org)
  - 4G: Long-Term Evolution (LTE) standard

# Reti cellulari 4G/5G

## *similarità con Internet cablato*

- Distinzione periferia/nucleo, ma entrambi appartengono allo stesso *carrier*
- Rete cellulare globale: una rete di reti
- Uso diffuso di protocolli: HTTP, DNS, TCP, UDP, IP, NAT, separazione tra piano di controllo e piano di dati, SDN, Ethernet, tunneling
- Interconnessione a Internet cablato

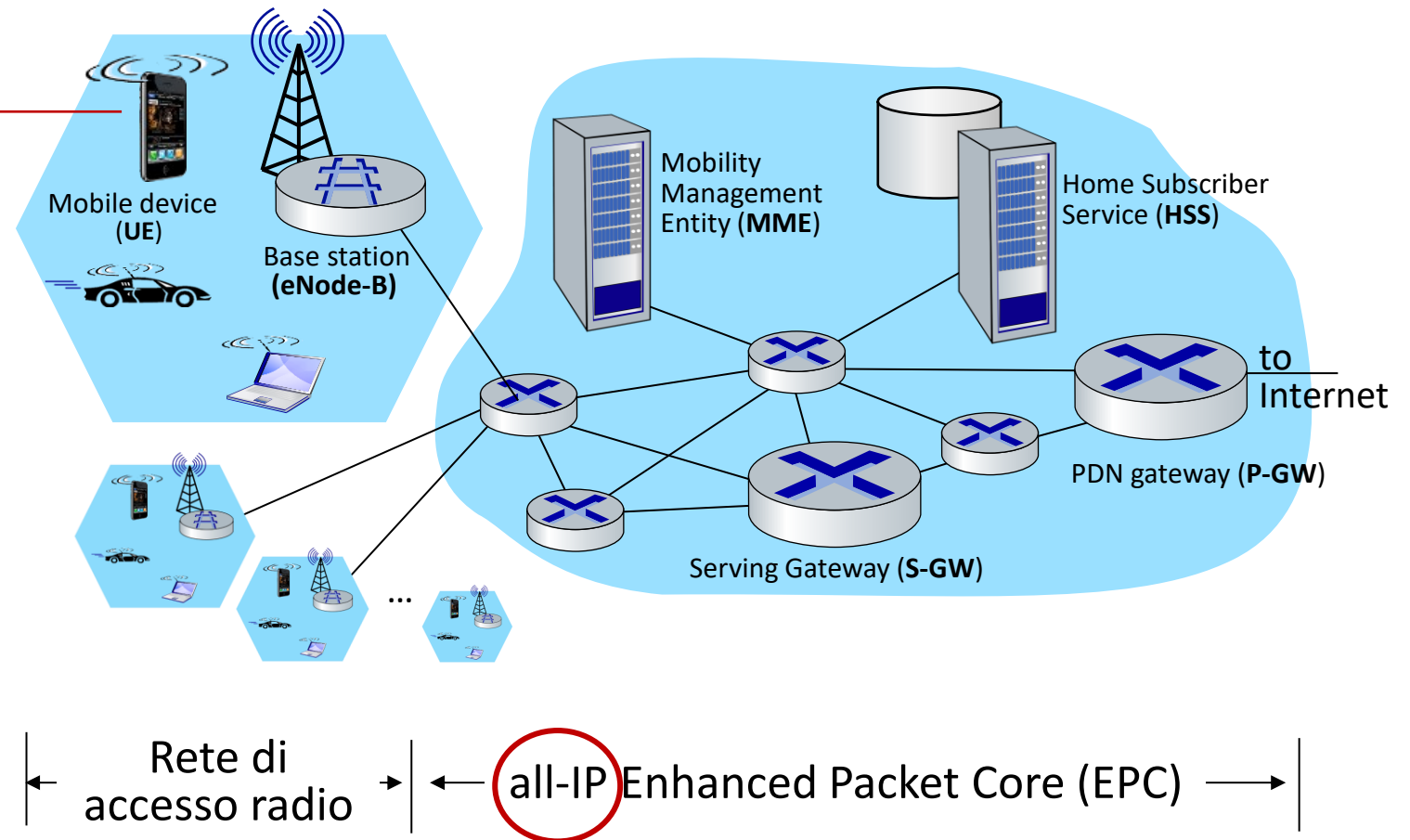
## *Differenze con Internet cablato*

- Differenti protocolli livello di collegamento wireless
- Mobilità come servizio di 1° classe
- "identità" dell'utente (attraverso la SIM card)
- modello di business: gli utenti si abbonano a un operatore di telefonia mobile
  - forte nozione di “home network”, contrapposta al roaming in una "visited network"
  - accesso globale, con infrastruttura di autenticazione, e accordi tra operatori

# Elementi dell'architettura 4G

## Mobile device:

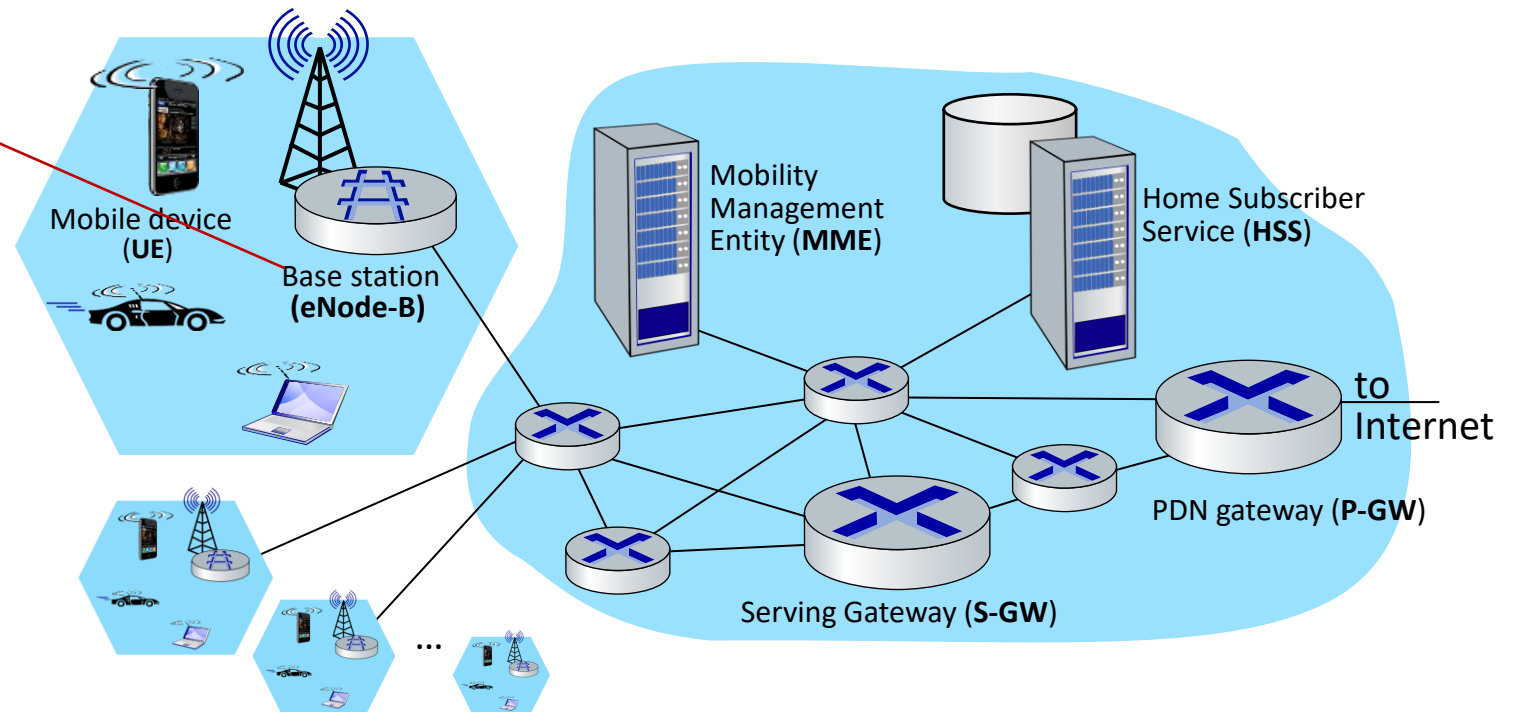
- smartphone, tablet, laptop, IoT, ... con radio 4G LTE
- International Mobile Subscriber Identity (IMSI) a 64-bit, memorizzato sulla SIM (Subscriber Identity Module) card
- Gergo LTE: User Equipment (UE)



# Elementi dell'architettura 4G

## Base station (stazione base):

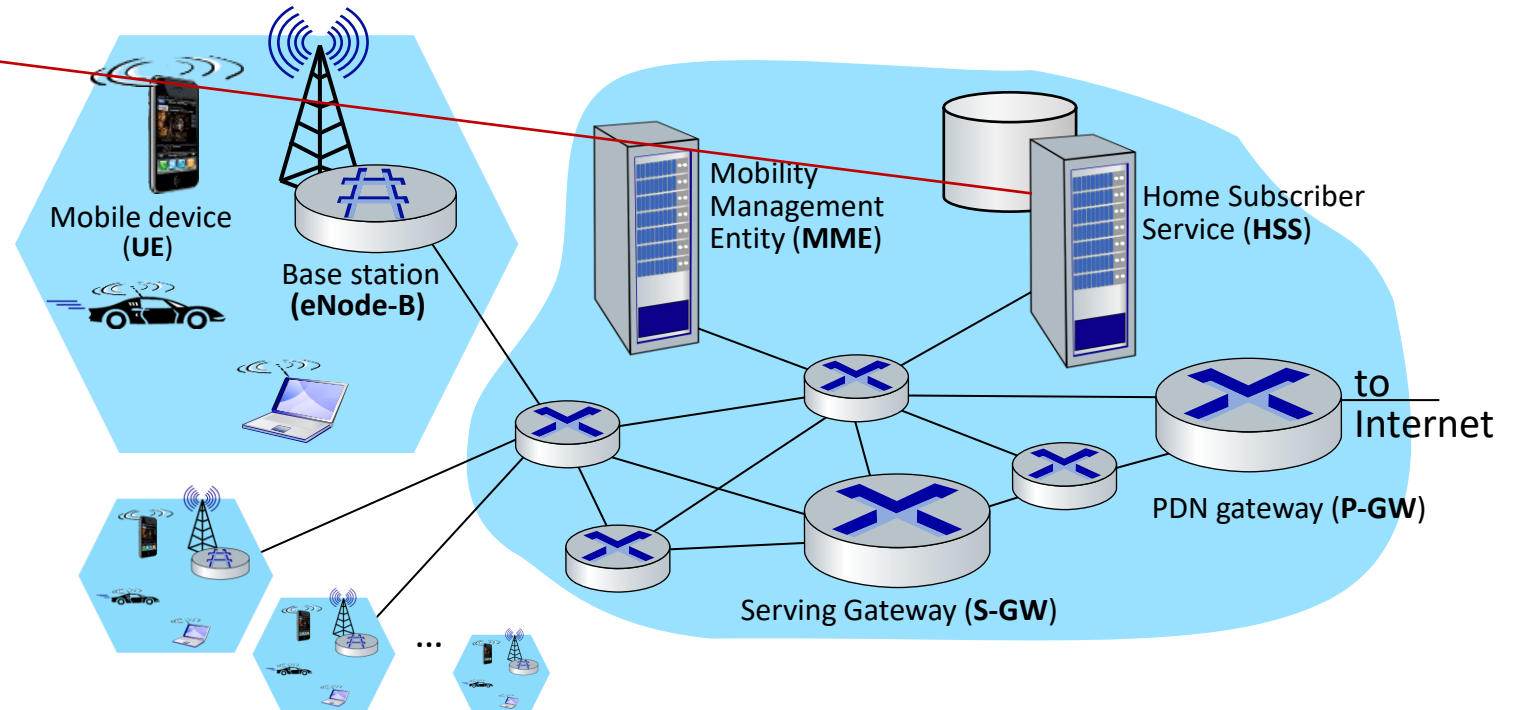
- alla “periferia” della rete dell'operatore
- gestisce le risorse radio, per i mobile device nella propria area di copertura (“cella”)
- coordina l'autenticazione del dispositivo con altri elementi
- simile all'AP WiFi ma:
  - ruolo attivo nella mobilità degli utenti
  - si coordina con quasi tutte le base station per ottimizzare l'uso della radio
- Gergo LTE: eNode-B



# Elementi dell'architettura 4G

## Home Subscriber Service

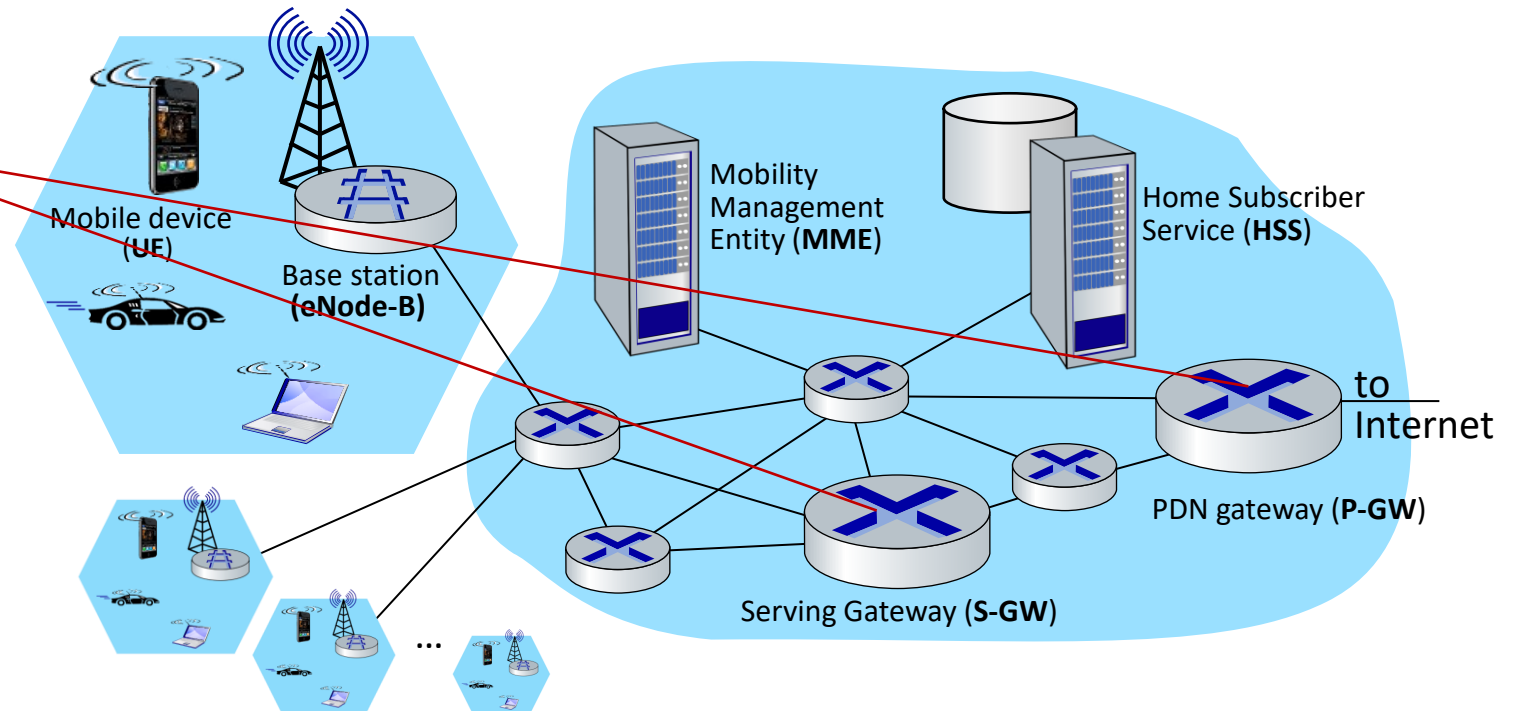
- memorizza informazioni sui mobile device per i quali la rete dell'HSS è la loro “home network”
- lavora con l'MME per l'autenticazione dei dispositivi



# Elementi dell'architettura 4G

## Serving Gateway (S-GW), PDN Gateway (P-GW)

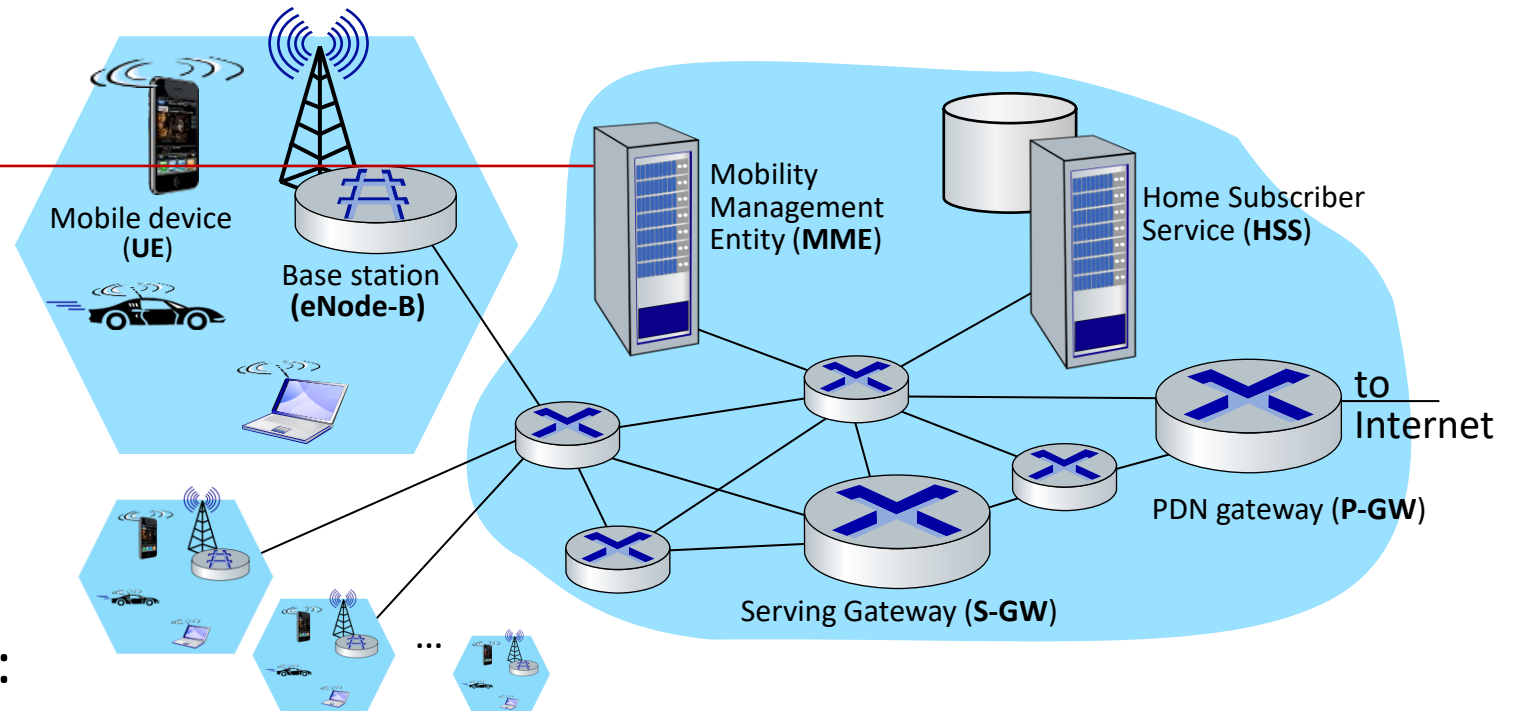
- situati lungo il percorso dei dati tra Internet e il mobile device
- P-GW
  - gateway per la rete mobile cellulare
  - appare come qualunque altro router di Internet
  - fornisce servizi NAT
- altri router:
  - uso estensivo di tunneling



# Elementi dell'architettura 4G

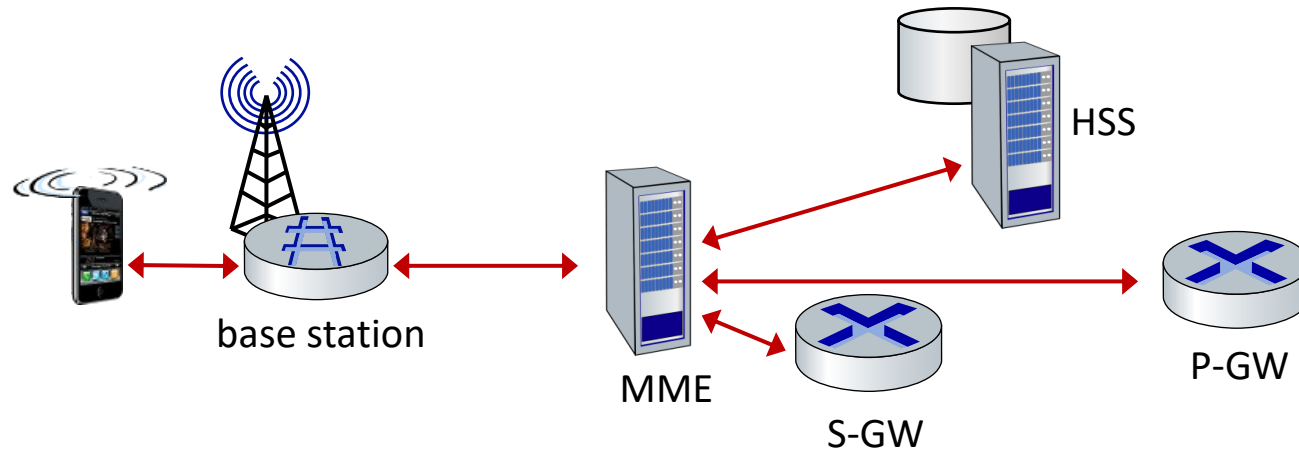
## Mobility Management Entity

- Autenticazione dei device (device-to-network, network-to-device) coordinata con l'HSS della home network HSS del dispositivo mobile
- gestione dei dispositivi mobili:
  - handover dei device tra celle
  - tracking/paging della posizione dei device
- setup del percorso (tunneling) dal mobile device e il P-GW



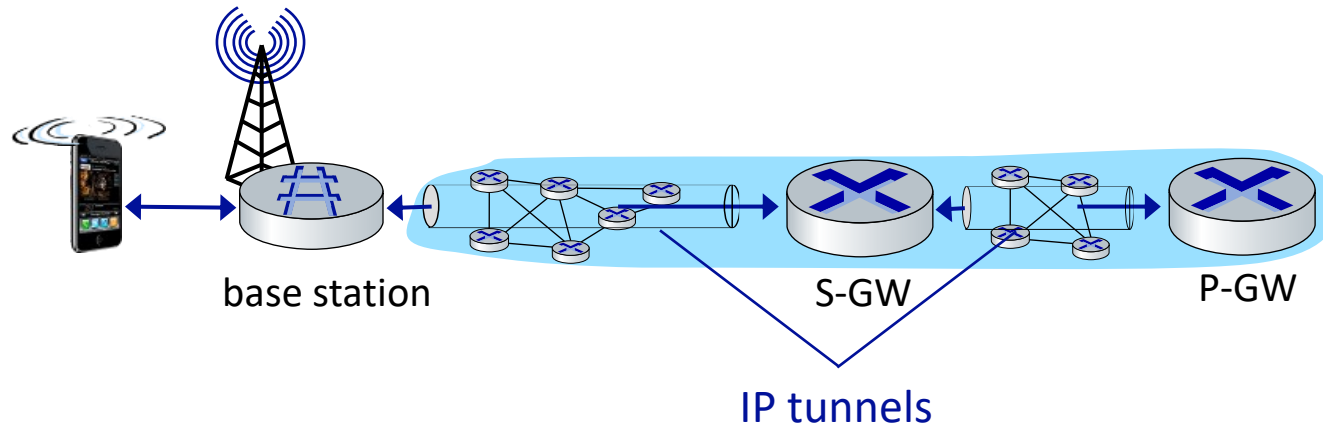


# LTE: separazione del piano dei dati e di controllo



## piano di controllo

- Nuovi protocolli per la gestione della mobilità, la sicurezza e l'autenticazione

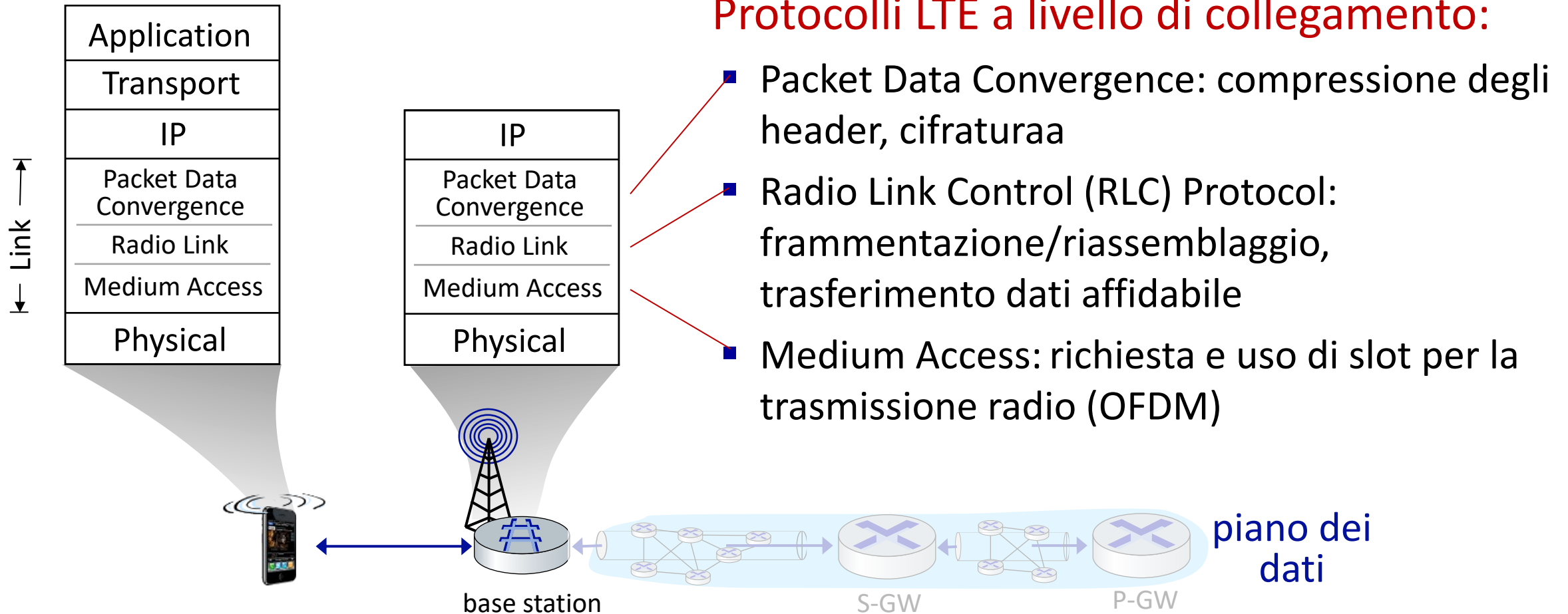


## piano dei dati

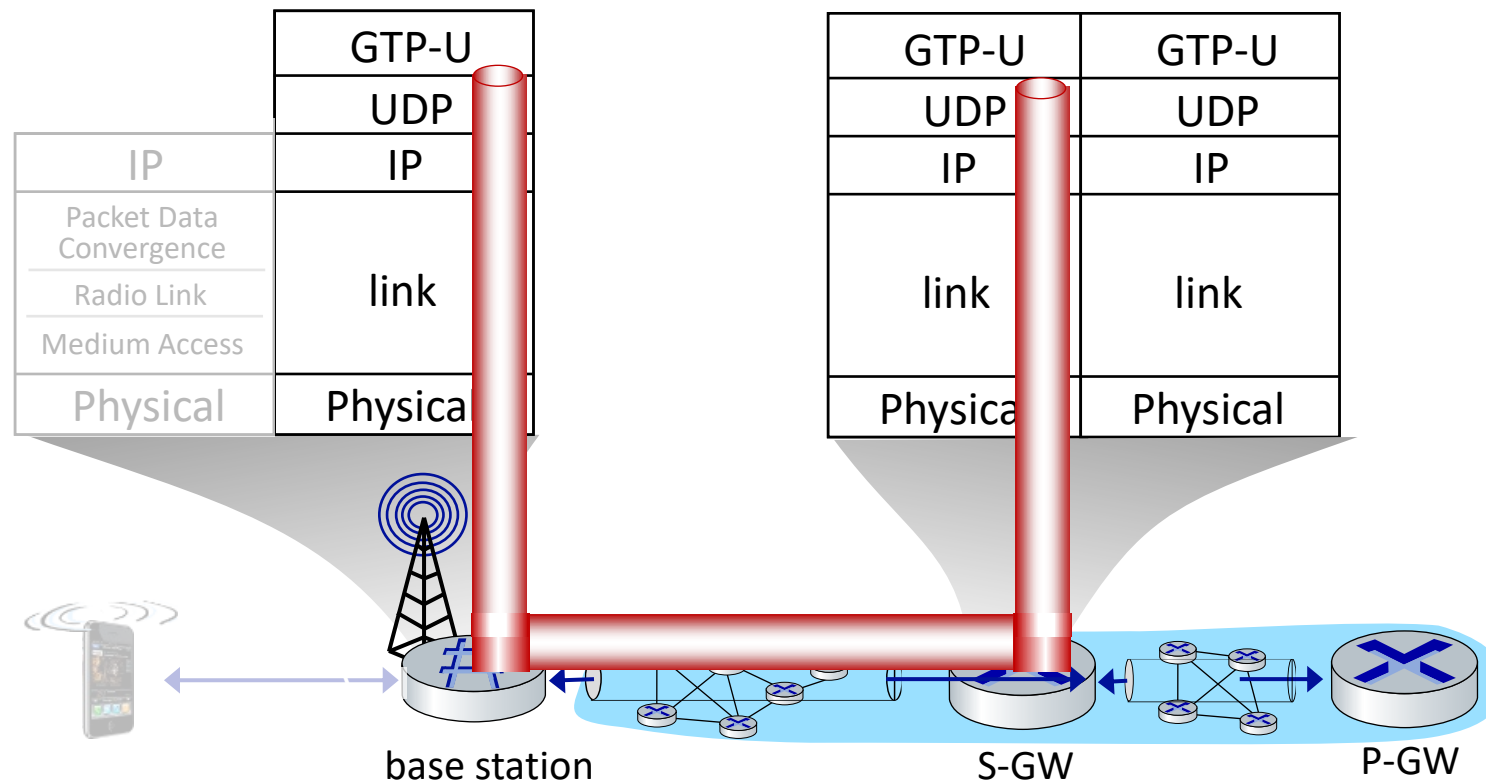
- nuovi protocolli a livello fisico e di collegamento
- uso estensivo di tunnel per gestire la mobilità

# Pila protocollare del piano dei dati LTE: first hop

## Protocolli LTE a livello di collegamento:



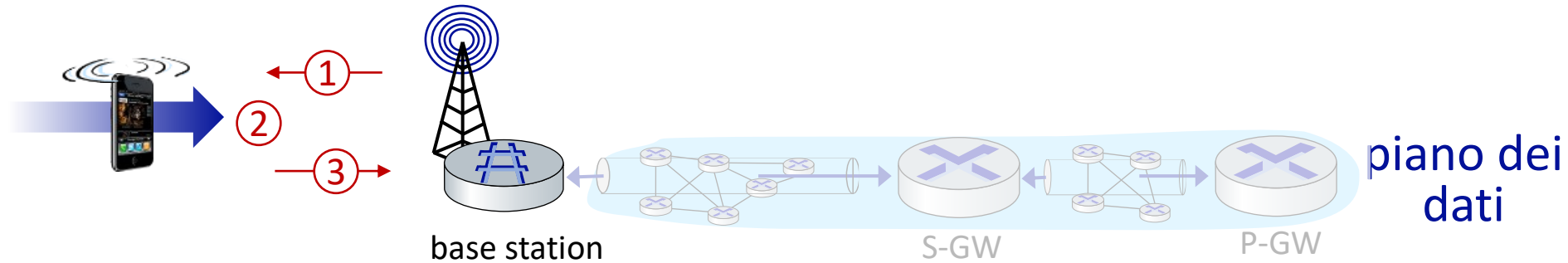
# Pila protocollare del piano dei dati LTE: packet core



## tunneling:

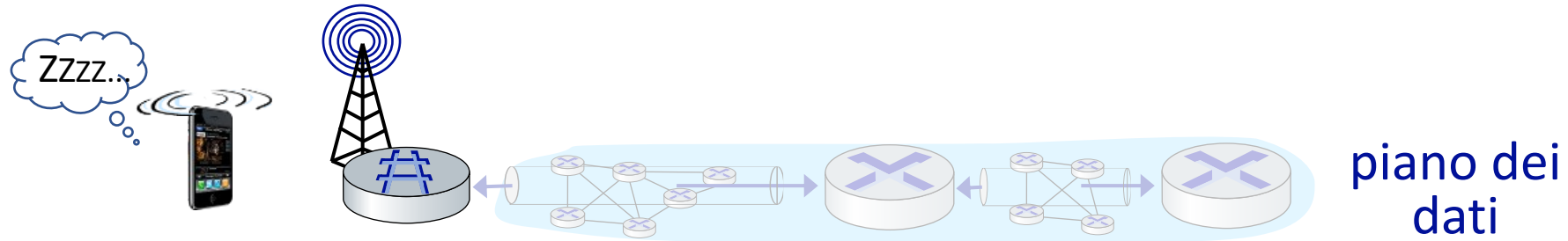
- datagrammi mobile incapsulati usando GPRS Tunneling Protocol (GTP), inviati dentro datagrammi UDP all'S-GW
- S-GW reinvia i datagrammi al P-GW tramite un altro tunnel
- supporta la mobilità: solo gli endpoint del tunnel cambiano quando l'utente mobile si sposta

# Piano dei dati LTE: associazione con una BS



- ① BS invia in broadcast un segnale di sincronizzazione primario ogni 5 ms su tutte le frequenze
  - BS di più carrier possono inviare in broadcast segnali di sincronizzazione
- ② Il mobile node trova un segnale di sincronizzazione primario, quindi individua il secondo segnale di sincronizzazione su questa frequenza.
  - il mobile node trova quindi le informazioni trasmesse dalla BS: larghezza di banda del canale, configurazioni, informazioni sul vettore cellulare della BS.
  - il mobile node può ricevere informazioni da più stazioni di base, più reti cellulari
- ③ il mobile node sceglie con quale BS associarsi (ad esempio, preferendo la rete dell'operatore d'origine)
- ④ sono necessari altri passaggi per l'autenticazione, la creazione dello stato e la configurazione del piano dati.

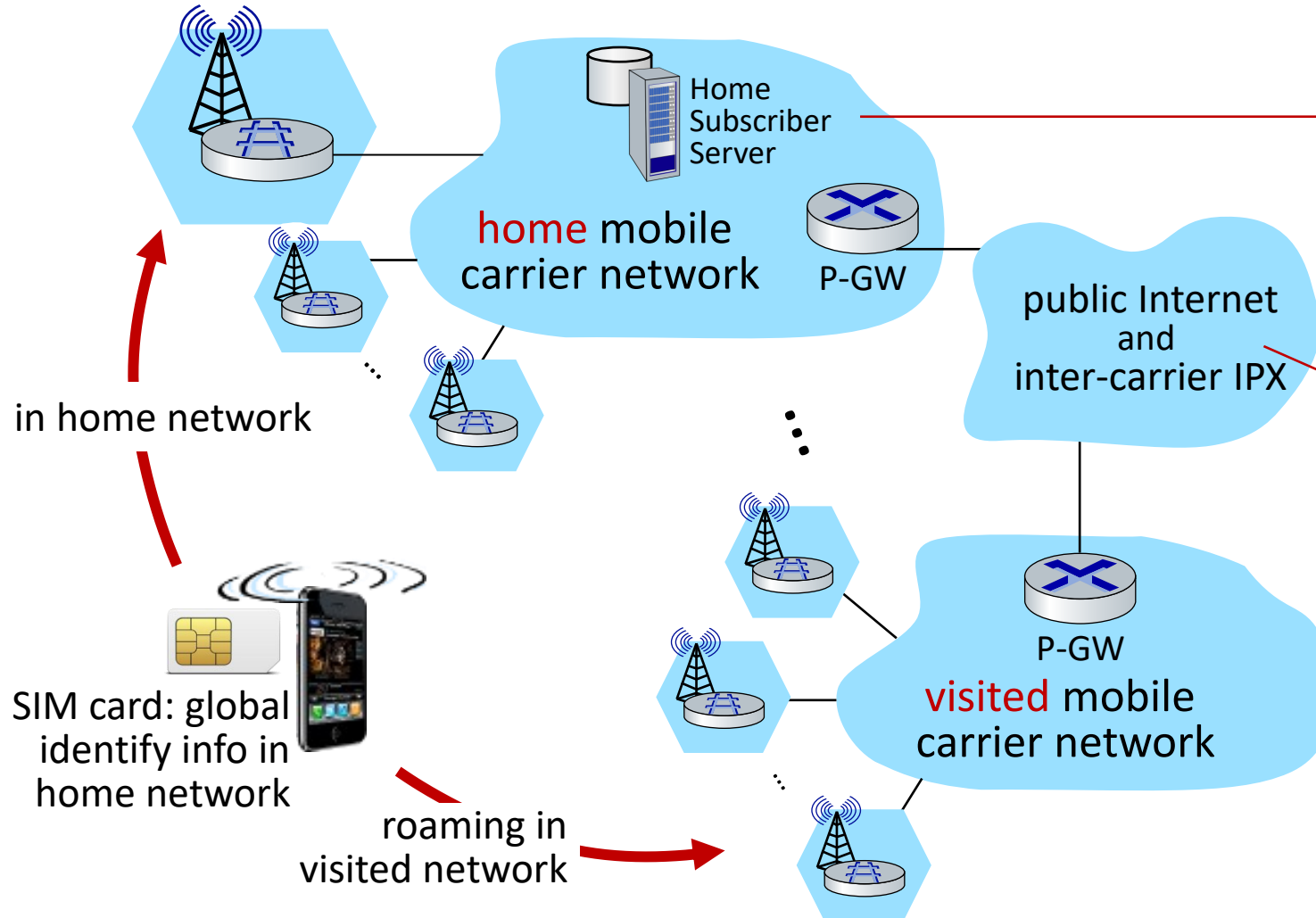
# LTE: sleep modes



come in WiFi, Bluetooth: i mobile node LTE possono mettere la radio a “dormire” per preservare la batteria:

- **light sleep:** dopo centinaia di millisecondi di inattività
  - si sveglia periodicamente (centinaia di ms) per controllare le trasmissioni downstream
- **deep sleep:** dopo 5-10 secondi of inattività
  - la mobilità può cambiare le celle durante il sonno profondo: è necessario ristabilire l'associazione.

# Rete cellulare globale: una rete di reti IP



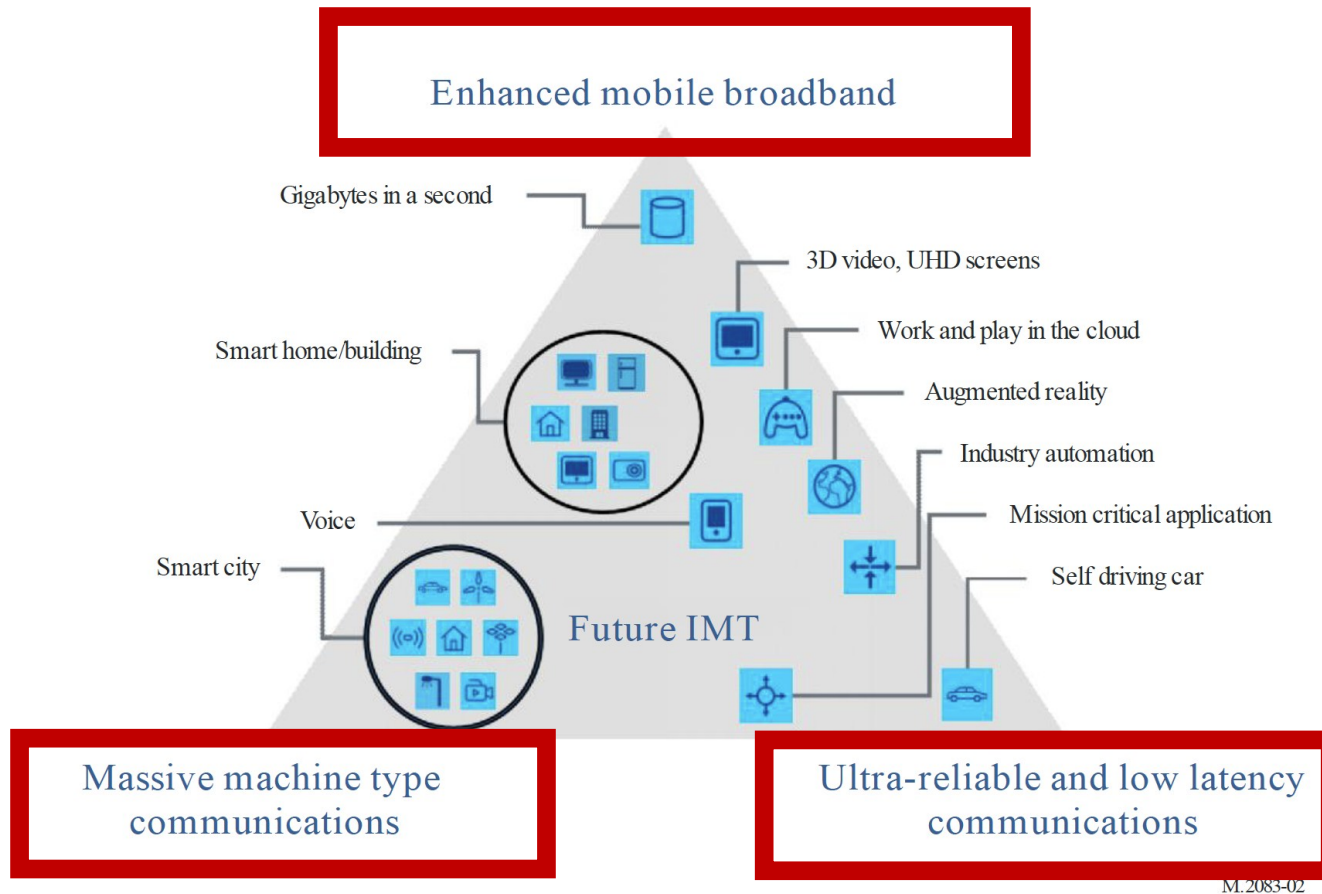
## home network HSS:

- informazioni sull'identificazione e sui servizi, mentre si è nella rete domestica e in roaming

## all IP:

- gli operatori si interconnettono tra di loro e on l'internet pubblico nei punti di scambio
- legacy 2G, 3G: non tutto IP, gestito altrimenti

# Passaggio al 5G: motivazione



“initial standards and launches have mostly focused on **enhanced Mobile Broadband**, 5G is expected to increasingly enable new business models and countless new use cases, in particular those of **massive Machine Type Communications** and **Ultra-reliable and Low Latency Communications**.”

Figure: from Recommendation ITU-R M.2083-0 (2015)



# Passaggio al 5G: motivazione

- **obiettivo:** incremento di 10x del bitrate di picco, riduzione di 10x della latenza, aumento di 100x della capacità di traffico rispetto 4G
- **5G NR (new radio):**
  - due bande di frequenza: FR1 (450 MHz–6 GHz) and FR2 (24 GHz–52 GHz): frequenze delle onde millimetriche
  - non è retrocompatibile con il 4G
  - MIMO: antenne multiple direzionali
- **frequenze delle onde millimetriche:** velocità di trasmissione dei dati molto più elevate, ma su distanze più brevi
  - pico-cell: diametro: 10-100 m
  - necessaria distribuzione massiccia e densa di nuove stazioni di base

# 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

# Cos'è la mobilità?

- spettro della mobilità, dal punto di vista del **livello di rete**:

nessuna mobilità

alta mobilità



il dispositivo si sposta tra le reti di accesso, ma è spento durante lo spostamento.

il dispositivo si sposta entro la stessa rete di accesso wireless, in una sola rete di fornitore

il dispositivo si sposta tra reti di accesso in una singola rete di fornitore, mantenendo connessioni in corso

Il dispositivo si sposta tra reti di fornitori differenti, mantenendo connessioni in corso

*Siamo interessati a questi!*

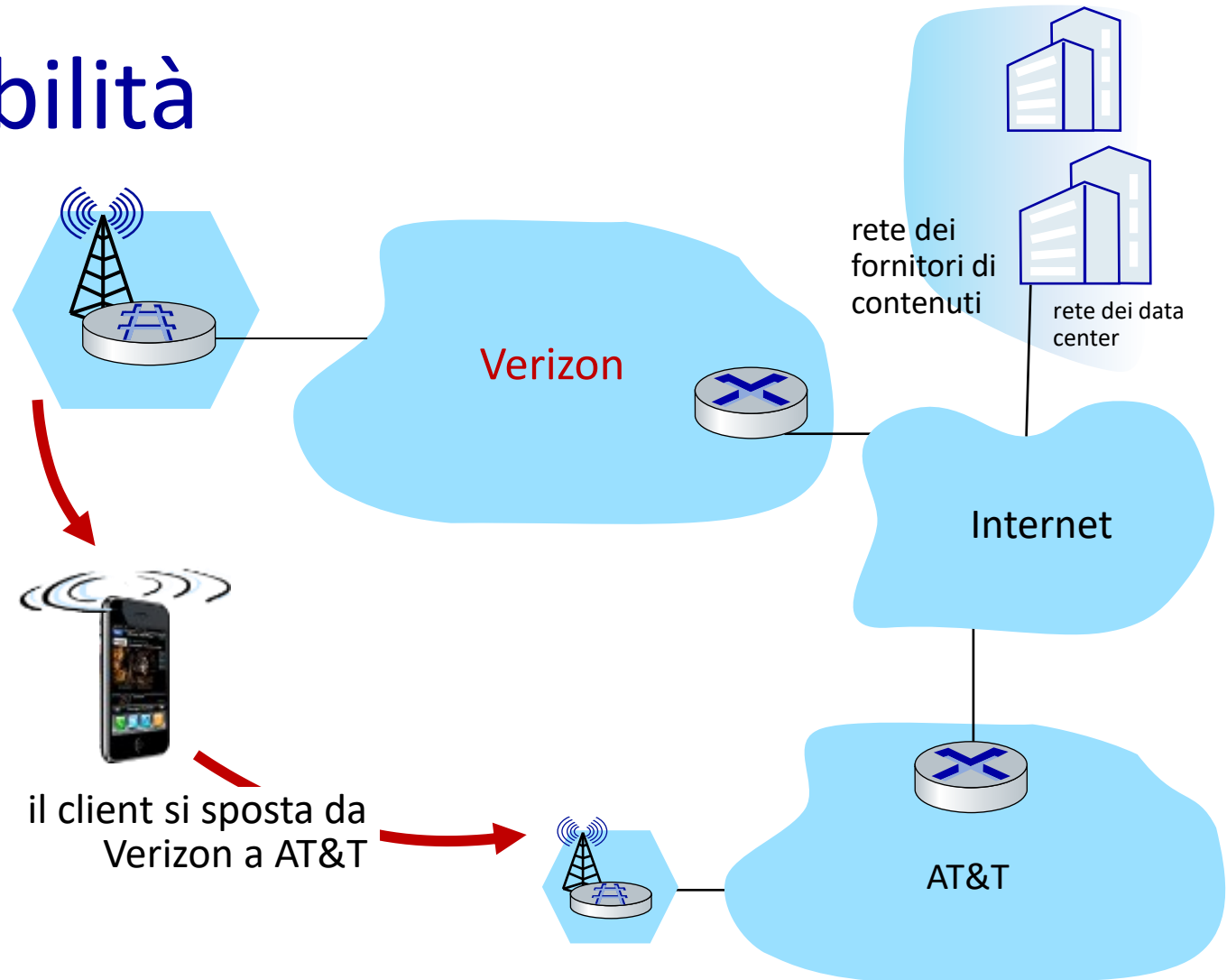
all'interno di una sola base station, non c'è neanche mobilità a livello di collegamento



# Il problema della mobilità

Se un dispositivo si sposta da una rete all'altra:

- Come farà la “rete” a sapere che deve inoltrare i pacchetti alla *nuova* rete?



# Approcci alla mobilità

- lasciare che sia la rete (i router) a gestirla:
  - i router annunciano il nome, l'indirizzo IP permanente del nodo mobile in visita tramite lo scambio della tabella di routing
  - quando un dispositivo mobile abbandona una *visited network*, questa ritira la rotta
  - il routing di Internet potrebbe già farlo *senza* alcuna modifica! Le tabelle di routing indicano la posizione di ogni nodo mobile tramite la corrispondenza del prefisso più lungo!

# Mobility approaches

- lasciare che sia la rete (i router) a gestirla:
  - i router annunciano il nome del nodo mobile e il suo IP permanente del nodo mobile in visita tramite lo scambio di messaggi di routing
  - quando un dispositivo mobile visita una rete visitata, questa ritira la rotta
  - il routing di Internet potrebbe funzionare *senza* alcuna modifica! Le tabelle di routing indicano la posizione di ogni cellulare tramite la corrispondenza del prefisso più lungo!
- lasciare che siano gli end-system a gestirla: funzionalità nella "periferia"
  - *instradamento indiretto (indirect routing)*: la comunicazione dal corrispondente al dispositivo mobile attraverso la rete home, viene quindi inoltrata al dispositivo mobile nella rete visitata
  - *instradamento diretto (direct routing)*: il corrispondente ottiene l'indirizzo del dispositivo mobile nella rete visitata, invia direttamente al dispositivo mobile



# Contattare un amico

Considerate un amico che cambia spesso domicilio, come lo trovate?

- cercate in tutti gli elenchi telefonici?
- vi aspettate che vi faccia sapere dove sta?
- chiamate i suoi genitori?
- Facebook!

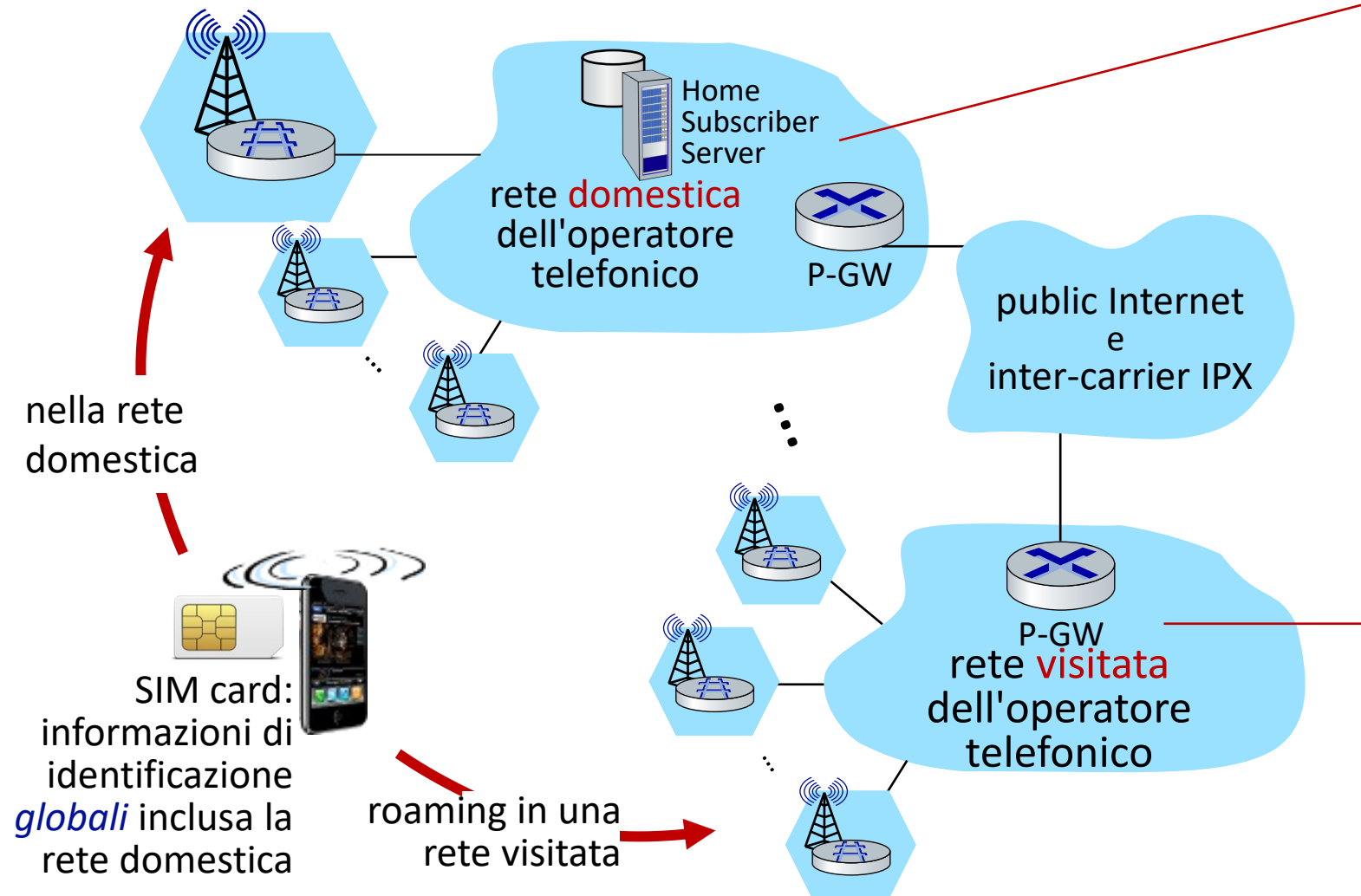
L'importanza di avere una "casa":

- una fonte di informazioni definitive su di voi
- un posto dove le persone possono trovare dove vi trovate





# Rete domestica, rete visitata: 4G/5G



## home network (rete domestica):

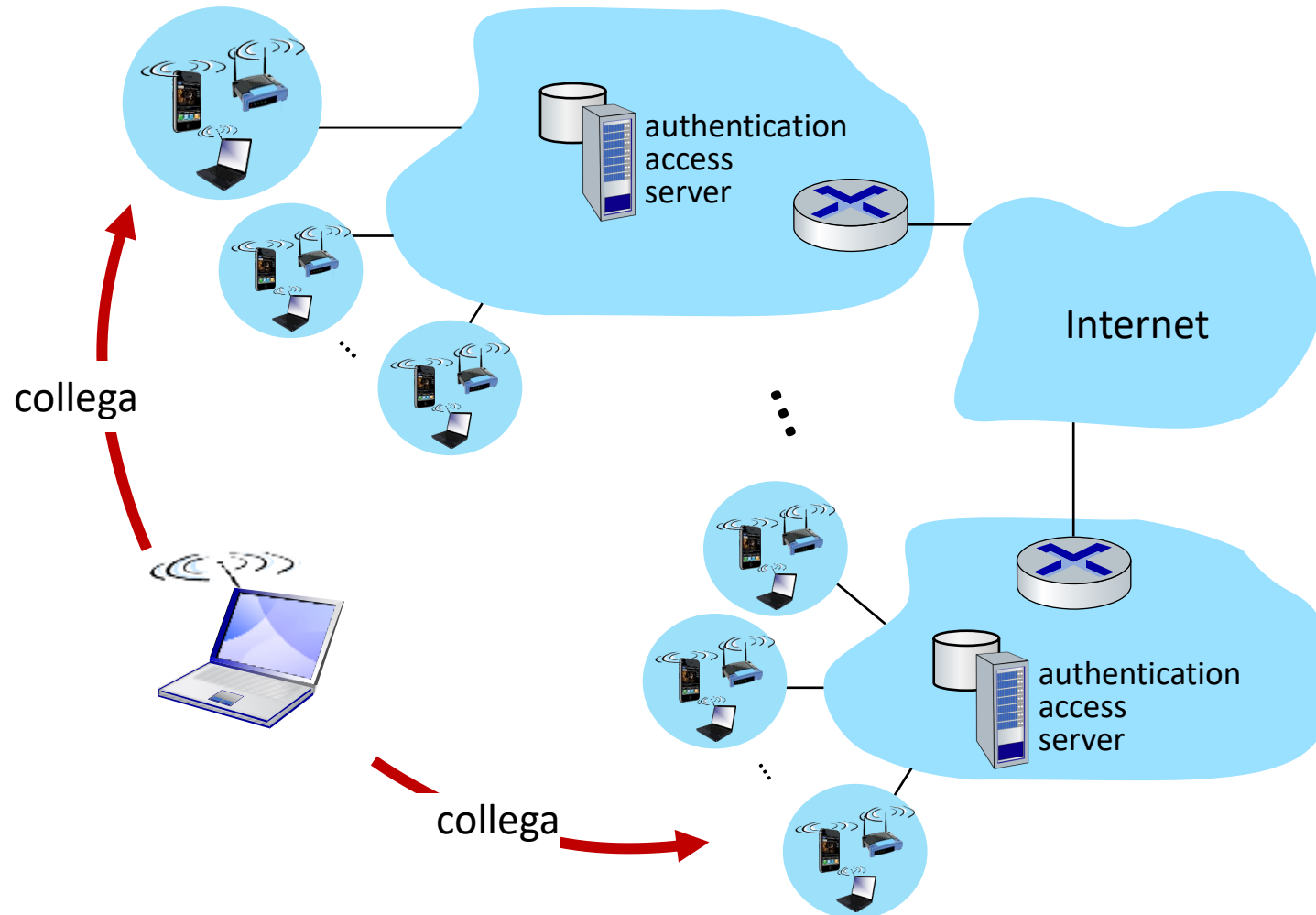
- piano di servizio (a pagamento) con un operatore di telefonia mobile
- L'HSS della rete domestica memorizza le informazioni circa l'identità e i servizi

## visited network (rete visitata):

- qualsiasi altra rete diversa dalla tua rete domestica
- accordo di servizio con altre reti: per fornire l'accesso alla telefonia mobile in visita

# Rete domestica, rete visitata: ISP/WiFi

ISP/WiFi: nessuna nozione di "casa"

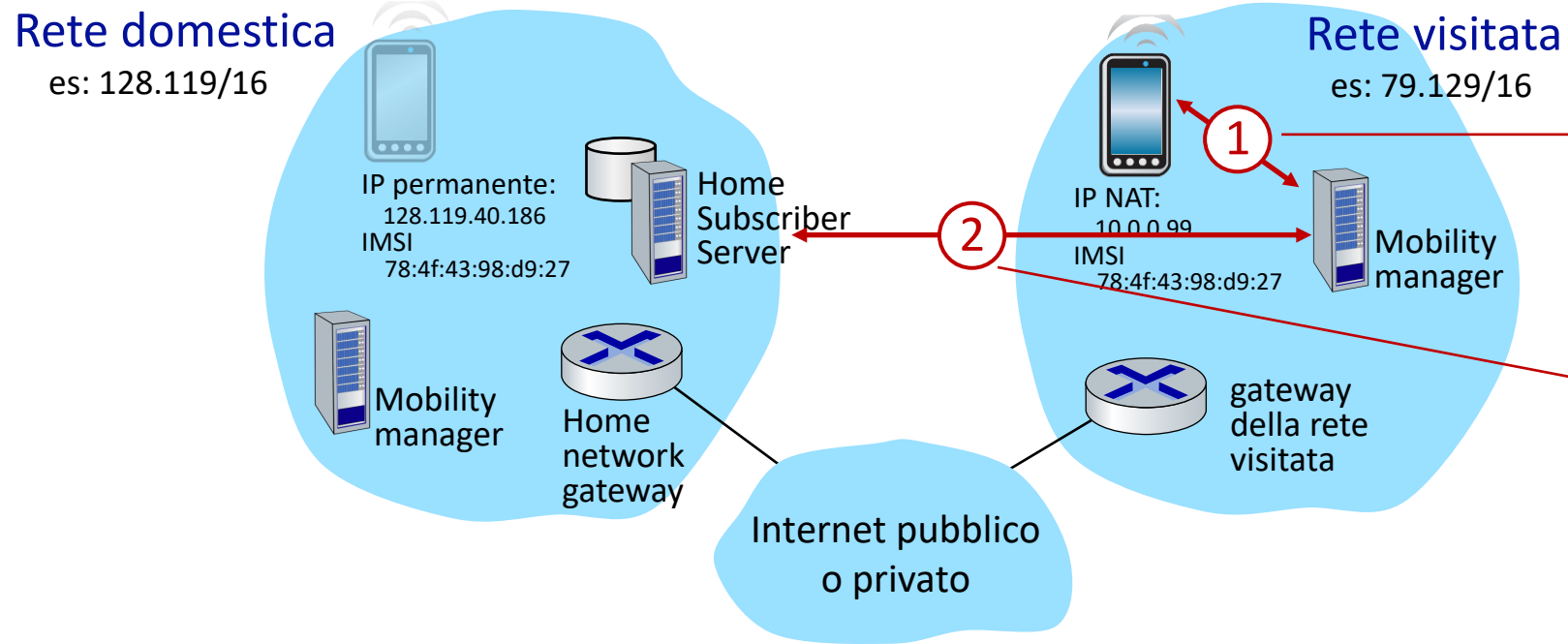


- credenziali dell'ISP (ad esempio, nome utente, password) memorizzate sul dispositivo o presso l'utente
- gli ISP possono avere una presenza nazionale o internazionale
- reti differenti: credenziali differenti
  - alcune eccezioni (es., eduroam)
  - Esistono architetture (IP mobile) per la mobilità di tipo 4G, ma non sono utilizzate.

# Rete domestica, rete visitata: visione generica



# Registrazione: casa deve sapere dove stai!



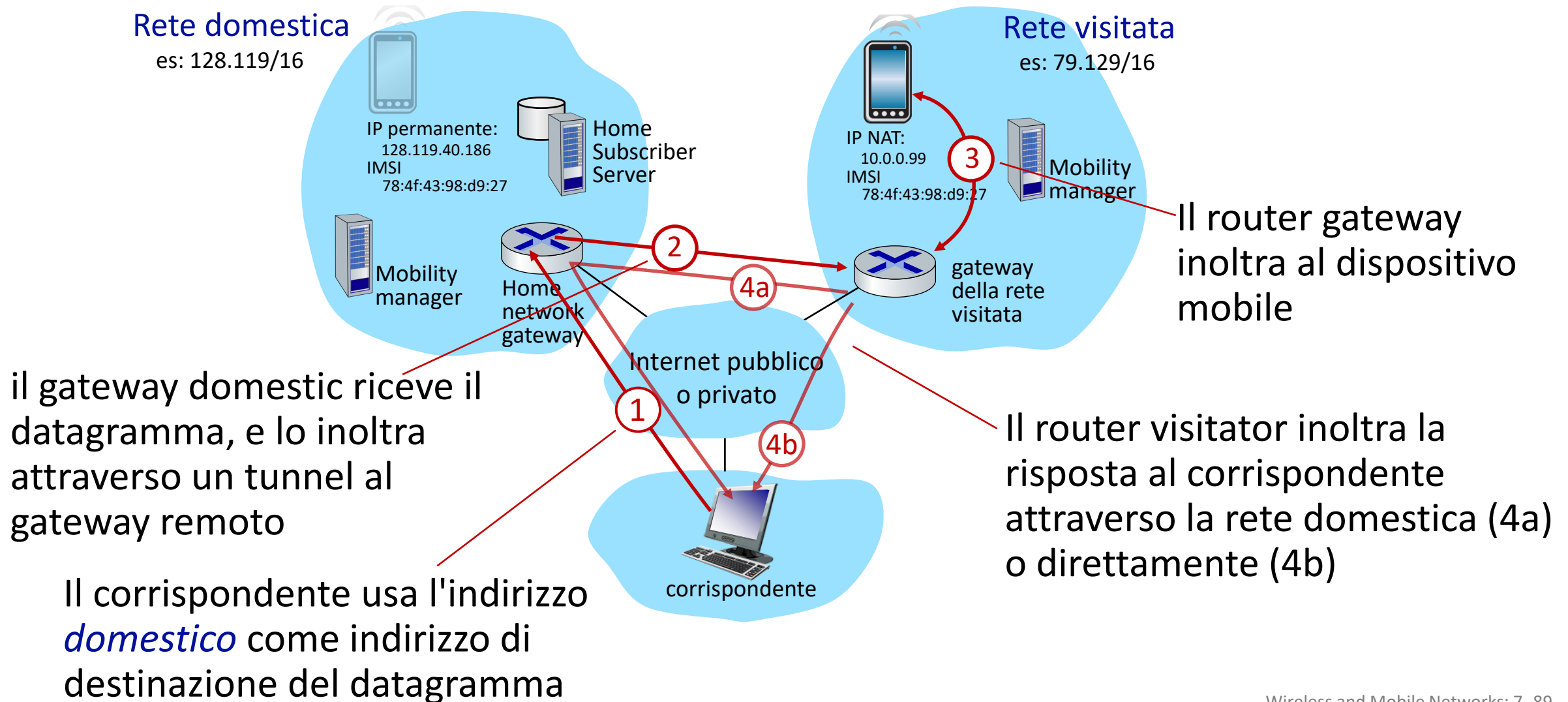
il nodo mobile *si associa* al mobility manager visitato

il mobility manager visitato *registra* la posizione del dispositivo mobile nell'HSS della rete domestica

Risultato finale:

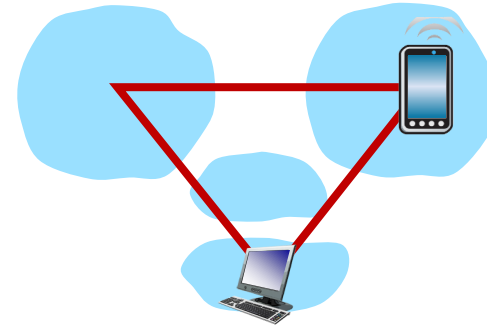
- il mobility manager visitato sa del dispositivo mobile
- l'HSS domestico sa la posizione del dispositivo mobile

# Mobilità con routing indiretto



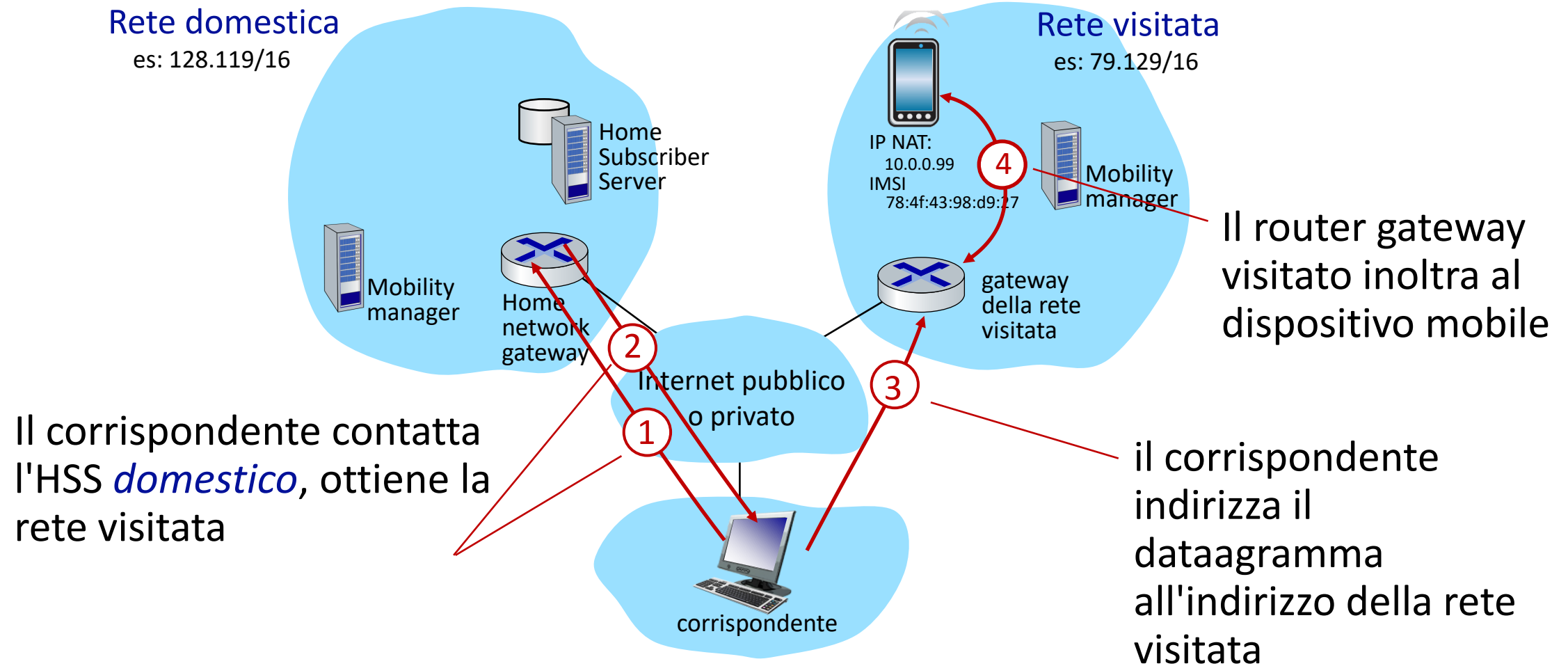
# Mobilità con routing indiretto: commenti

- instradamento triangolare (triangular routing):
  - inefficiente se il corrispondente e il dispositivo mobile sono nella stessa rete



- Il dispositivo mobile si sposta tra reti visitate: trasparente al corrispondente!
  - si registra in una nuova rete visitata
  - la nuova rete visitata si registra presso l'HSS domestico
  - i datagrammi continuano a essere inoltrati dalla rete domestica al dispositivo mobile nella nuova rete
  - *connessioni (es., TCP) in corso tra il corrispondente e il dispositivo mobile possono essere mantenute!*

# Mobilità con routing diretto





# Mobilità con routing diretto: commenti

- supera le inefficienze dell'instradamento triangolare
- *non-transparente al corrispondente*: il corrispondente deve ottenere l'indirizzo care-of (nella rete vistata) dall'agente domestico
- che succede se il dispositivo mobile cambia rete?
  - può essere gestito, ma aggiunge complessità

# Sommario

- Introduzione

## Wireless

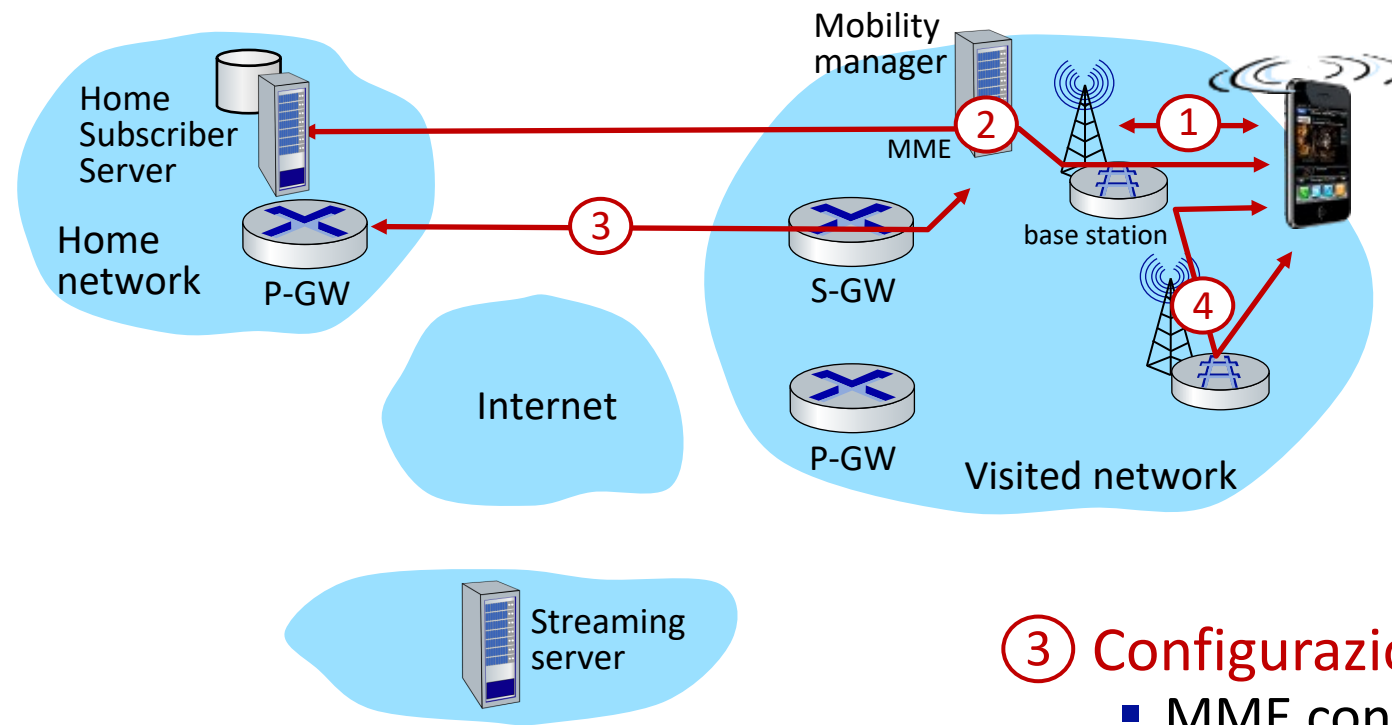
- Collegamenti wireless e caratteristiche della rete
- WiFi: 802.11 wireless LAN
- Reti cellulari: 4G e 5G
- Bluetooth



## Mobilità

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

# Mobilità nelle reti 4G: compiti di mobilità principali



- ① associazione alla stazione base:
- il dispositivo mobile fornisce l'IMSI – identificando se stesso e la home network

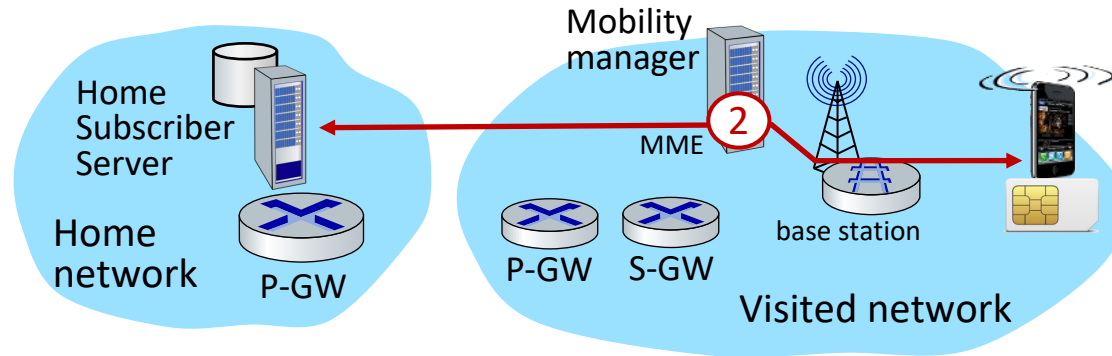
- ② Configurazione del piano di controllo:
- MME, home HSS stabiliscono lo stato del piano di controllo - il mobile device è nella visited network

- ③ Configurazione del piano di dati:
- MME configura tunnel di inoltro per il dispositivo mobile
  - la visited network e la home network stabiliscono tunnel da home P-GW a cellulare

- ④ mobile handover:

- il dispositivo mobile cambia il proprio punto di aggancio nella rete visitata

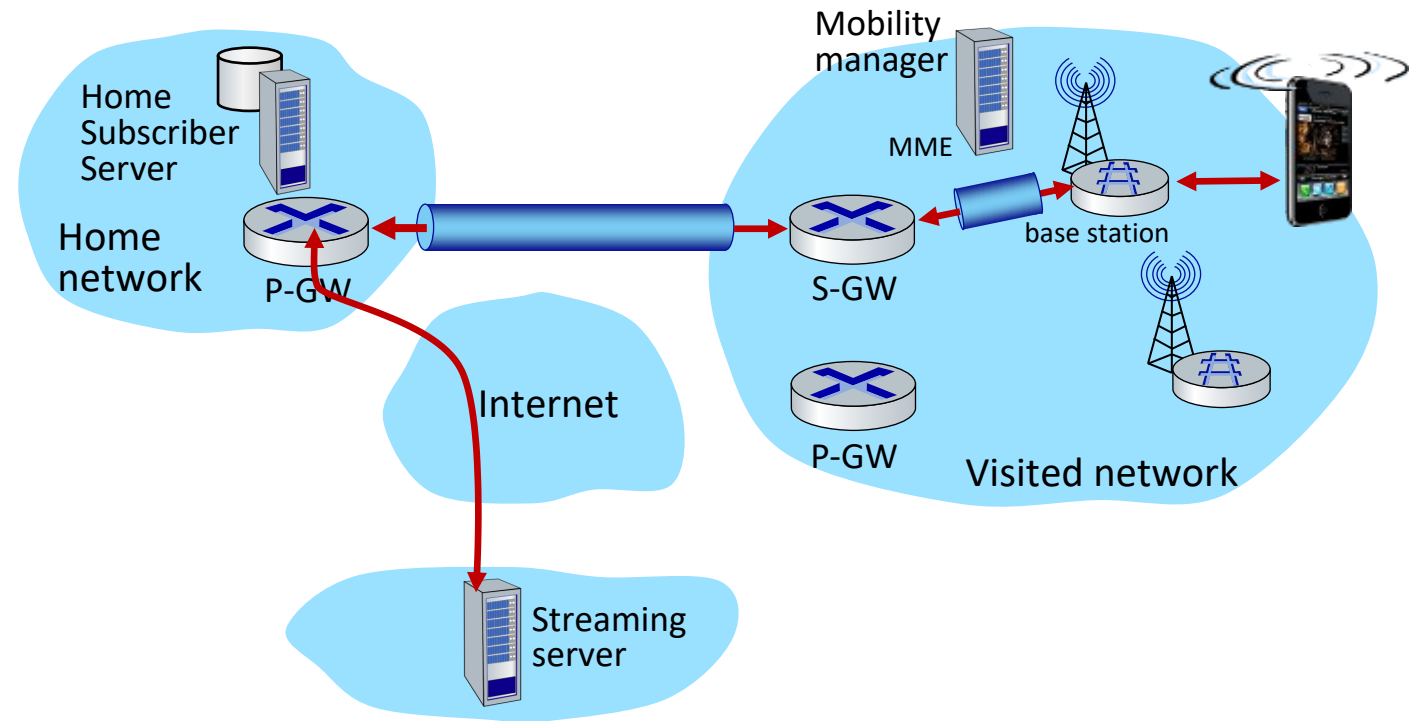
# Configuring LTE control-plane elements



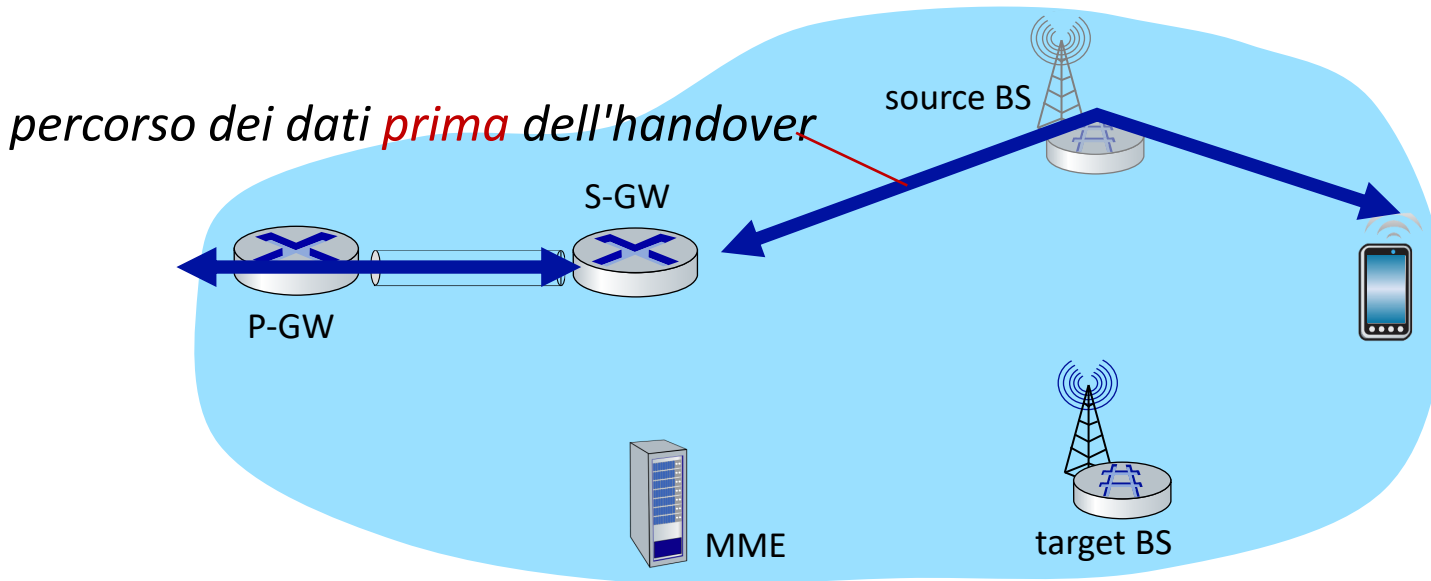
- Il dispositivo mobile comunica con l'MME locale attraverso il canale del piano di controllo con la BS
- L'MME usa l'informazione sull'IMSI del dispositivo mobile per contattare l'HSS della home network del dispositivo
  - Recupera informazioni per l'autenticazione, la cifratura e si servizi di rete
  - L'HSS nella home network sa ora che il dispositivo mobile è residente nella visited network
- La BS e il dispositivo mobile selezionano i parametri per il canale radio tra BS e dispositivo mobile nel piano di dati

# Configurazione dei tunnel del piano dati per un cellulare

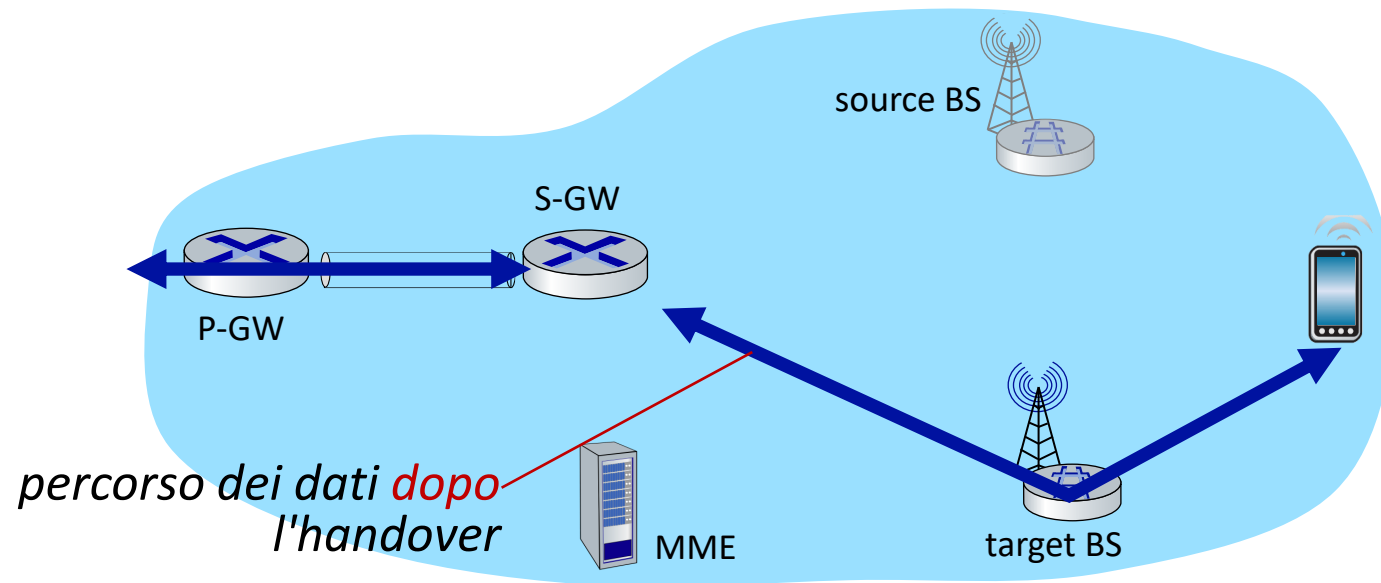
- tunnel da S-GW a BS:  
quando il dispositivo mobile cambia stazione base, semplicemente cambia l'indirizzo IP dell'estremità del tunnel
- tunnel da S-GW a home P-GW tunnel:  
implementazione dell'instradamento indiretto
- tunneling attraverso GTP (GPRS tunneling protocol): il datagramma del dispositivo mobile al server di streaming incapsulato utilizzando GTP all'interno di UDP, all'interno del datagramma



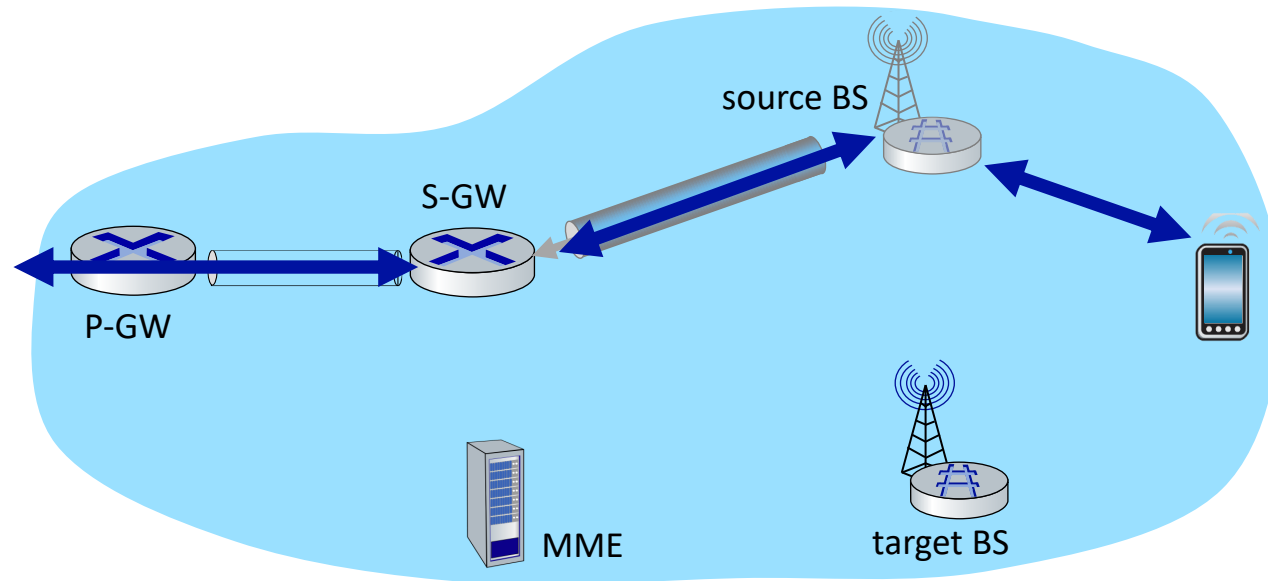
# Handover tra BS nella stessa rete cellulare



# Handover tra BS nella stessa rete cellulare

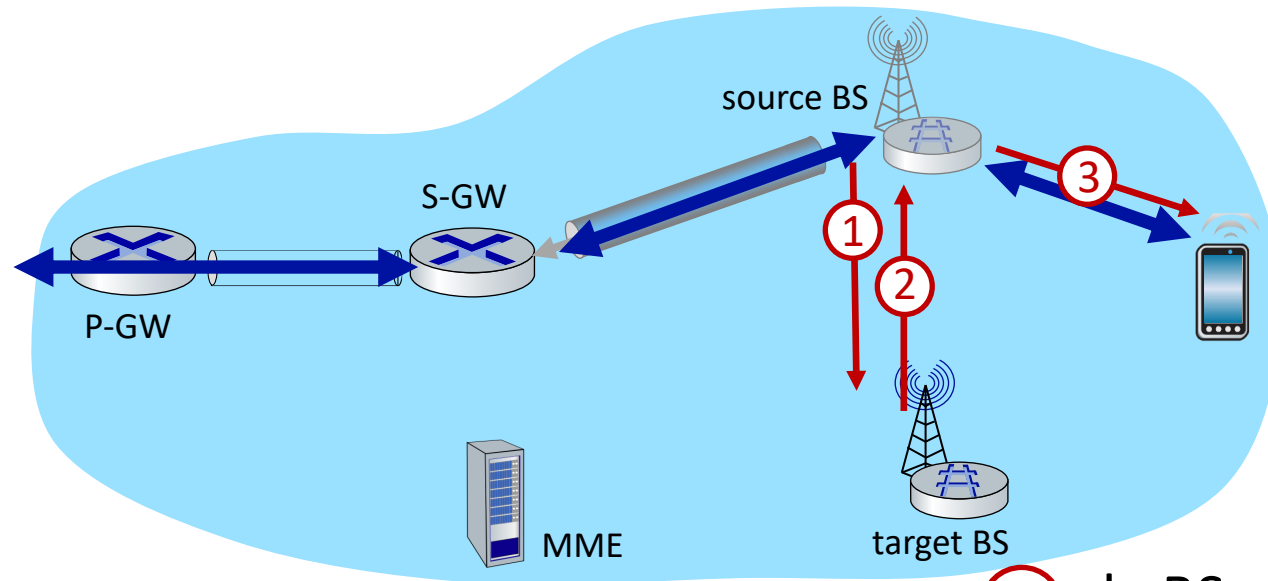


# Handover tra BS nella stessa rete cellulare



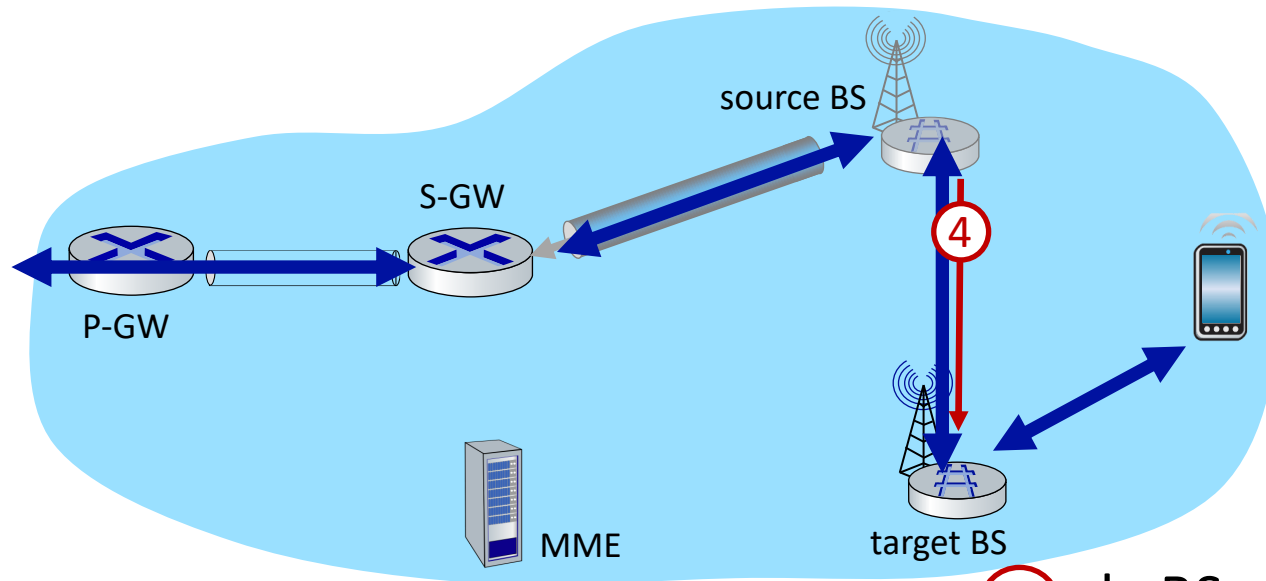


# Handover tra BS nella stessa rete cellulare



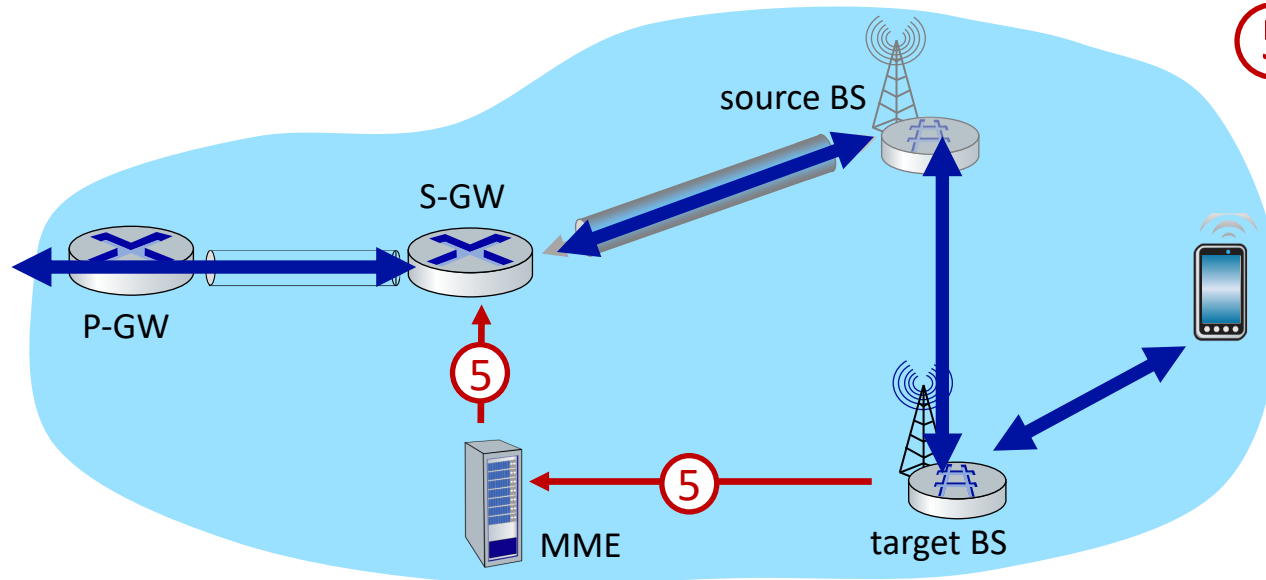
- ① la BS corrente (source) seleziona il BS target, invia un messaggio di *Richiesta di Handover* al BS target
- ② la BS target pre-alloca slot temporali nel canale radio, risponde con un ACK con informazioni necessarie al dispositivo mobile per associarsi alla nuova BS
- ③ la BS source informa il dispositivo mobile della nuova stazione base
  - il dispositivo mobile può ora inviare attraverso la nuova BS - handover *appare* completo al dispositivo mobile

# Handover tra BS nella stessa rete cellulare



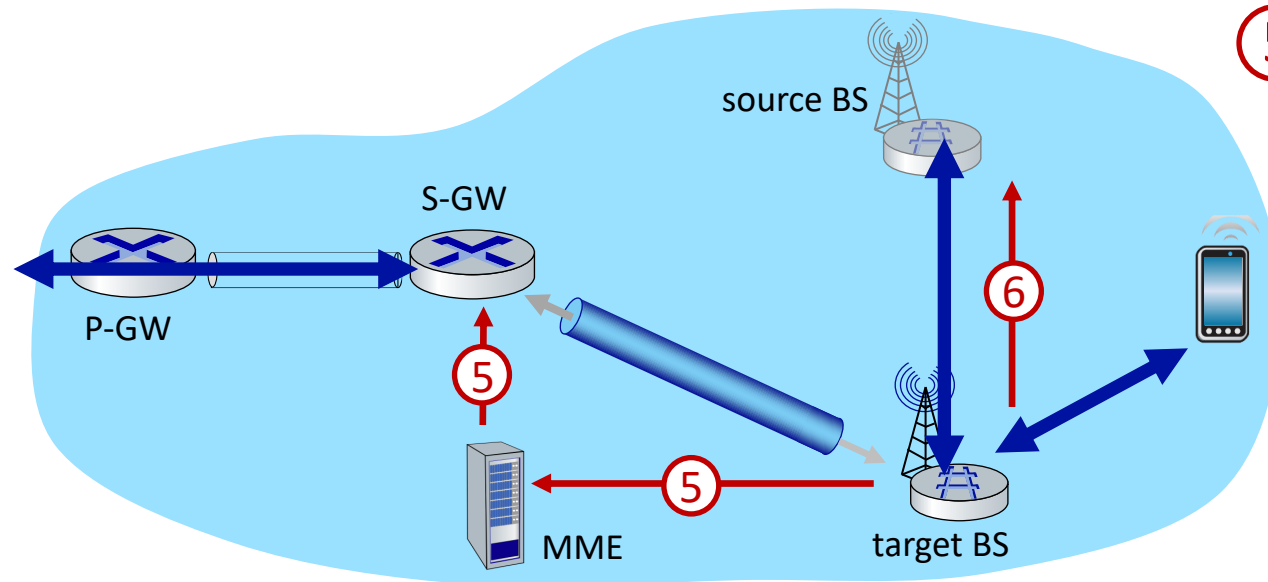
- ① la BS corrente (source) seleziona il BS target, invia un messaggio di *Richiesta di Handover* al BS target
- ② la BS target pre-alloca slot temporali nel canale radio, risponde con un ACK con informazioni necessarie al dispositivo mobile per associarsi alla nuova BS
- ③ la BS source informa il dispositivo mobile della nuova stazione base
  - il dispositivo mobile può ora inviare attraverso la nuova BS - handover *appare* completo al dispositivo mobile
- ④ la BS source smette di inviare datagrammi al cellulare, inoltra invece alla nuova BS (che inoltra al dispositivo mobile attraverso il canale radio)

# Handover tra BS nella stessa rete cellulare



- ⑤ la BS target informa l'MME che è la nuova BS per il dispositivo mobile
- l'MME istruisce l'S-GW per cambiare l'estremità del tunnel alla (nuova) BS target

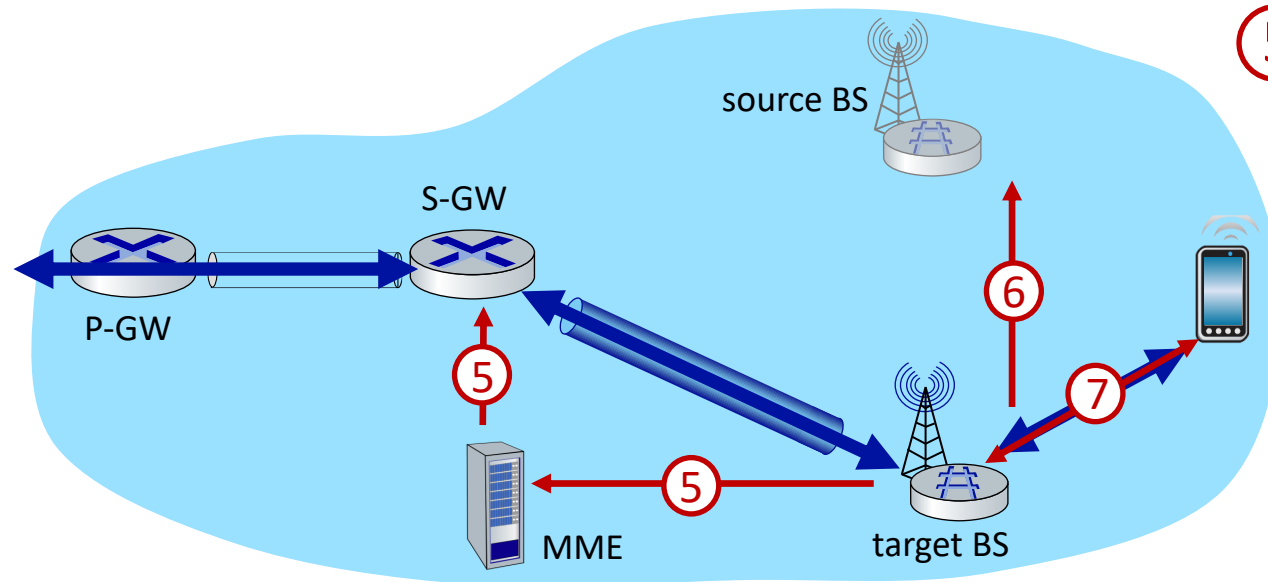
# Handover tra BS nella stessa rete cellulare



- ⑤ la BS target informa l'MME che è la nuova BS per il dispositivo mobile
- l'MME istruisce l'S-GW per cambiare l'estremità del tunnel alla (nuova) BS target

- ⑥ la BS target manda un ACK indietro alla BS source: handover completo, la BS source può rilasciare le risorse

# Handover tra BS nella stessa rete cellulare



- ⑤ la BS target informa l'MME che è la nuova BS per il dispositivo mobile
- l'MME istruisce l'S-GW per cambiare l'estremità del tunnel alla (nuova) BS target

- ⑥ la BS target manda un ACK indietro alla BS source: handover completo, la BS source può rilasciare le risorse
- ⑦ i datagrammi del dispositivo mobile ora fluiscono attraverso il nuovo tunnel dal BS target all'S-GW

# Mobile IP

- L'architettura di mobile IP standardizzata ~20 anni fa [RFC 5944]
  - Molto prima degli smartphone ubiqui e del supporto del 4G ai protocolli di Internet
  - Non ha visto un grande dispiegamento/uso
  - forse WiFi per Internet, e cellulari 2G/3G per la voce erano “sufficientemente buoni” al tempo
- architettura di mobile IP:
  - routing indiretto al nodo (attraverso la home network) usando tunnel
  - mobile IP home agent: combina i ruoli dell'HSS e dell'home P-GW in 4G
  - mobile IP foreign agent: combina i ruoli dell'MME e dell'S-GW in 4G
  - Protocolli per agent discovery nelle visited network, registrazione della posizione visitata nella home network attraverso estensioni di ICMP

# Wireless, mobilità: impatto sui protocolli di livello superiore

- logicamente, l'impatto *dovrebbe* essere minimo...
  - il modello di servizio best effort service model resta inalterato
  - TCP e UDP possono girare (e in effetti lo fanno) sul wireless e il mobile
- ... ma dal punto di vista delle prestazioni:
  - perdita/ritardo di pacchetti a causa di errori sui bit (pacchetti scartati, ritardi a causa di ritrasmissioni a livello di collegamento), e perdite di handover
  - TCP interpreta le perdite come congestione, riducendo la finestra di congestione senza motivo. Soluzioni:
    - recupero locale (infatti Wi-Fi implementa il trasferimento di dati affidabile)
    - consapevolezza del mittente dei collegamenti wireless (es. distinguendo le perdite causate dal wireless dalle perdite per congestione)
    - split connection (la connessione end-to-end divisa in una connessione da un capo all'access point wireless e una connessione dall'access point wireless all'altro capo)
  - traffico in tempo reale danneggiato dai ritardi
  - data la natura condivisa del canale wireless, occorre che le applicazione considerino la larghezza di banda come una risorsa scarsa

# Riassunto

- 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



# Riassunto

## Wireless

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

## Mobilità

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

