



RSO: Reti

spitfire

A.A. 2024-2025

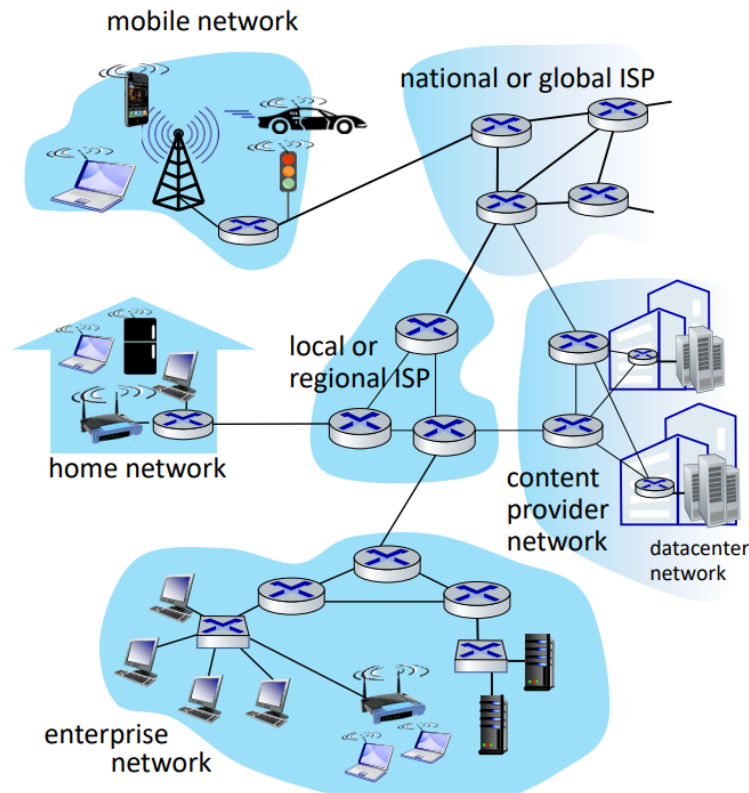
Contents

1	Introduzione	3
1.1	Introduzione alla struttura di internet	5
1.1.1	Network Edge	5
1.1.2	Access Networks	6
1.1.3	Network Core	6
1.2	Packet Switching: Store-and-Forward	7
1.3	Packet-Switching: queuing	8
1.4	Circuit Switching	8
1.4.1	Packet Switching vs Circuit Switching	9
1.5	Struttura di internet nel dettaglio	10
1.6	Metriche di performance nelle reti	13
1.6.1	Ritardo di accodamento e intensità di traffico	15
1.6.2	Perdita di pacchetti	15
1.6.3	Throughput	16
1.7	Strato protocollare e modelli di servizio	17
1.7.1	Servizi, Stratificazione e Incapsulamento	18

1 Introduzione

Se vogliamo dare una visione "d'insieme" di internet possiamo pensarlo come formato dalle seguenti componenti:

- Miliardi di **calcolatori** connessi:
 - **Hosts**: dispositivi di computazione e sistemi periferici
 - Sono sistemi che eseguono **applicazioni di rete** al "confine" della rete
- **Packet switches**: inoltrano i pacchetti ("pezzi" di dati) tra diversi nodi di rete
 - Router, switches, ...
 - Internet è una **rete a commutazione di pacchetto**
- **Communication links**: I collegamenti fra i veri nodi della rete
 - Fibra, rame, radio, satellite...
 - **Transmission rate**: capacità, in termini di bit/s, che il canale può supportare ("larghezza di banda").
- **Networks**: Collezioni di dispositivi, router, switches e links gestiti **tutti da una stessa organizzazione**
 - Reti residenziali, enterprise ecc... vengono dette solitamente **reti di accesso**, perché sono quelle reti che raccolgono il traffico dagli utenti per mandarlo in rete o viceversa.



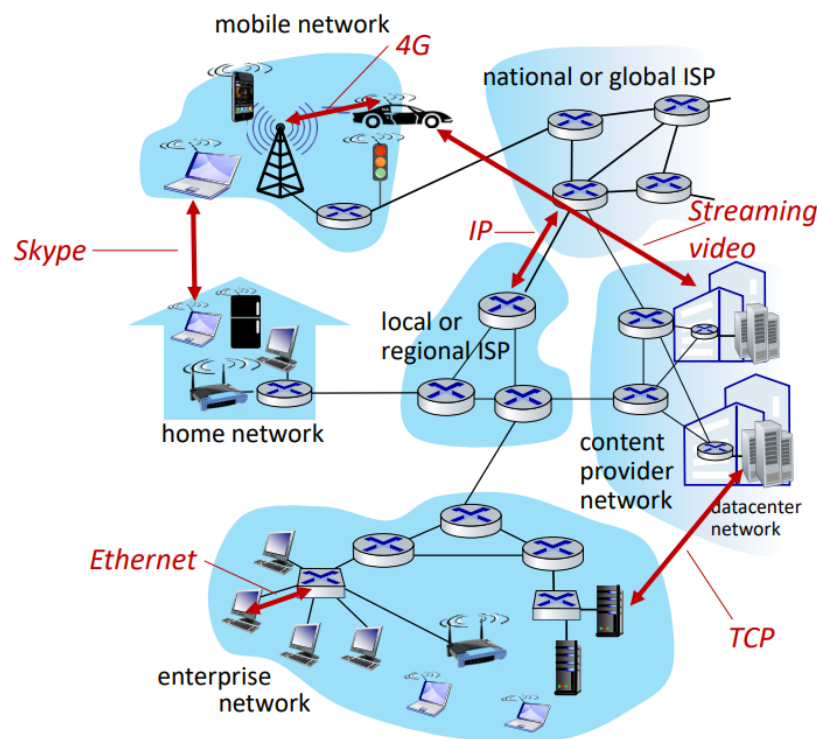
Internet è fisicamente una **rete connessa**, tuttavia vi sono dei sistemi che permettono di filtrare il traffico (firewall ecc...) per impedire che ogni nodo della rete sia accessibile da un qualsiasi altro nodo. Internet è quindi una **rete di reti** che interconnette le reti degli **Internet Service Providers (ISP)**, cioè quelle entità che forniscono servizi di connettività. Il funzionamento della rete internet è governato dai **protocolli di comunicazione**:

- Controllano il modo in cui avviene l'invio e il ricevimento dei messaggi
- Esempi sono i protocolli HTTP (web), TCP, IP, WiFi, 4G, Ethernet ecc..

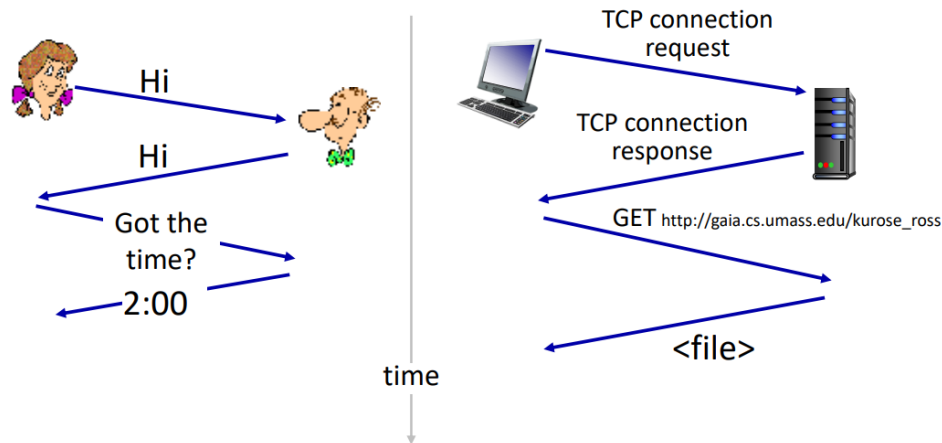
Protocolli di tipo diverso servono per **far comunicare dispositivi di tipo diverso**. Poiché il contesto delle reti è quindi molto eterogeneo, il tutto riesce a funzionare grazie agli **standard**. Esistono diversi enti di standardizzazione, tra cui citiamo:

- **RFC**: Request for Comments, documenti
- **IETF**: Internet Engineering Task Force; rilascia le RFC

Il compito degli enti di standardizzazione è quello di rilasciare documenti che vanno a definire le caratteristiche dei protocolli e delle architetture. Possiamo tuttavia vedere internet anche dal punto di vista dei **servizi**: internet può essere quindi vista come una **infrastruttura che offre dei servizi di connettività alle applicazioni distribuite**. Quindi, internet viene vista come una infrastruttura che **offre dei servizi di connettività tra nodi diversi**.



Abbiamo detto che la rete è governata da protocolli, ma **qual'è la definizione formale di protocollo?** Una definizione formale può essere la seguente: i **protocolli** definiscono il **formato**, l'**ordine dei messaggi inviati e ricevuti** tra le entità di rete e le **azioni intraprese** alla trasmissione e alla ricezione di un messaggio.



1.1 Introduzione alla struttura di internet

La struttura di alto livello di internet si può formalizzare nel seguente modo:

- **Network edge:** il confine della rete, comprende
 - **Hosts:** client e servers
 - I servers sono spesso in **data centers**

È oggetto di dibattito se includere il confine della rete nella struttura di internet o meno; ciò nonostante, rimane comunque una componente fondamentale.

- **Access Networks:** Sono tutte quelle reti che servono a raccogliere il traffico generato e destinato per gli utenti. Sono quindi i **punti di accesso alla rete per gli utenti**. Esse possono essere **cablate oppure wireless**.
- **Network Core:** È l'insieme di tutte quelle reti che sono composte da router interconnessi che permettono di realizzare il concetto di **rete di reti**. Il suo compito è quello di **connettere le reti di accesso fra di loro** e comprendono tutte quelle reti che, su larga scala, **permettono il funzionamento di internet**.

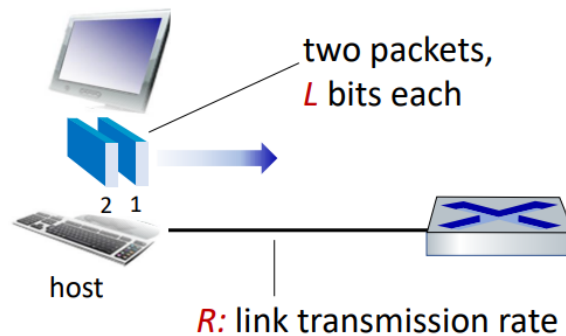
Ogni componente della struttura di internet viene detto **segmento**.

1.1.1 Network Edge

Il confine della rete è **popolato dagli host**. Il suo compito principale è quello di inviare i **pacchetti** generati dagli host (e quindi dagli utenti). Una visione ad alto livello di questo procedimento è:

- Il **messaggio applicativo** viene generato dall'host
- Esso viene **spezzettato in pezzetti**, chiamati **pacchetti**, di lunghezza L bits (questa cosa non è sempre vera: ci sono casi in cui i pacchetti hanno lunghezza variabile). Ognuno di questi pacchetti presenta una **intestazione**, cioè un determinato numero di bit che servono per permettere il funzionamento dei protocolli in rete

- Una volta generati i pacchetti, essi vengono trasmessi alla rete d'accesso ad un **tasso di trasmissione** (transmission rate) R , il quale è condizionato dalla **capacità di trasmissione del collegamento**



Ogni volta che invio un pacchetto in rete, ho un **ritardo di trasmissione**, il quale è il tempo necessario per trasmettere un pacchetto di L bit su un collegamento che ha capacità di trasporto di R bit/sec. Quindi:

$$\text{packet transmission delay} = \frac{L \text{ (bits)}}{R \text{ (bits/sec)}}$$

1.1.2 Access Networks

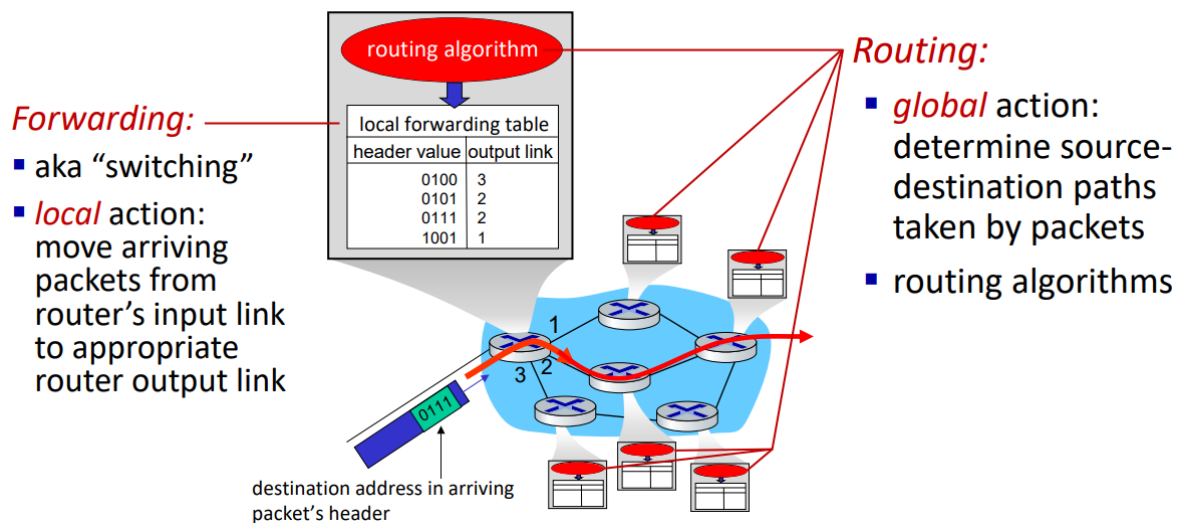
Come facciamo a **connettere gli host a "internet"**? Il compito di effettuare questa connessione è delle reti di accesso. Esse possono essere:

- Reti di accesso **residenziali**
- Reti di accesso **istituzionali**
- Reti di accesso **mobili**

1.1.3 Network Core

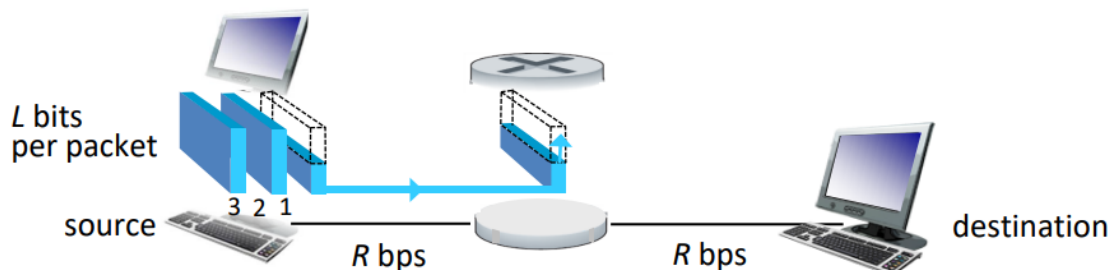
La Network Core è un insieme di **maglie di rete interconnesse**, le quali sono fondamentali per effettuare le operazioni di commutazione dei pacchetti. Esse garantiscono che i pacchetti possano essere trasmessi da un router verso l'altro attraverso dei collegamenti da una sorgente a una destinazione. Le reti di core presentano due **funzionalità fondamentali**: per spiegarle, dobbiamo prima capire **come funziona un router**: esso possiede al suo interno una tabella chiamata **tabella di inoltro** (forwarding table), che indica verso quale collegamento un pacchetto deve essere instradato in base al valore della sua intestazione (che quindi contiene, in termini generici, a chi deve essere recapitato questo pacchetto). L'operazione di **inoltro** (o **commutazione di pacchetto**) quindi consiste nell'invio sulla connessione corretta del pacchetto in arrivo (questa operazione viene anche detta **switching**). L'inoltro ha **valenza locale**: ogni router prende in considerazione solo la propria tabella di inoltro locale per decidere dove inoltrare un pacchetto. Tuttavia, questa operazione non basta per garantire che io possa raggiungere la destinazione corretta; per garantirlo dobbiamo effettuare un'altra operazione che prende il nome di **instradamento** (routing). Il routing è un'operazione **globale** che è

utilizzata per determinare **quale percorso, fra sorgente e destinazione, devono attraversare i pacchetti**. Ogni singolo router esegui quindi dei **protocolli** e degli **algoritmi di routing distribuiti** che hanno l'obiettivo di **popolare le tabelle di inoltro** (viene effettuato tramite algoritmi su grafo). Poiché gli algoritmi di routing sono **distribuiti**, essi richiedono lo **scambio di messaggi** e la **collaborazione tra i router**.



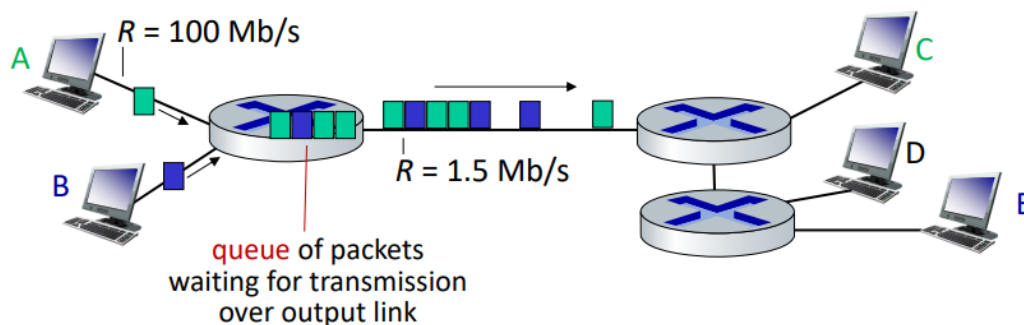
1.2 Packet Switching: Store-and-Forward

Nelle reti a commutazione di pacchetto, **ogni pacchetto ha vita propria**: una volta che il messaggio viene spezzettato in pacchetti, ognuno di esso ha un ciclo di vita indipendente dagli altri. La modalità di trasmissione usata da tutte le reti a commutazione di pacchetto è quella del **store-and-forward**: quando un pacchetto arriva ad un commutatore per essere commutato, esso deve **arrivare interamente prima di essere trasmesso al nodo successivo**. Tuttavia, si può pensare di saltare questo passaggio e trasmettere direttamente ogni bit che arriva su un certo nodo al successivo. Perché non viene fatto nelle reti a commutazione di pacchetto? Il motivo risiede nelle **intestazioni dei pacchetti**: infatti, è lì che trovo **tutte le informazioni necessarie per gestire un pacchetto**, quindi devo aspettare che essa venga trasmessa per intero prima di procedere all'invio al nodo successivo.



1.3 Packet-Switching: queuing

Seppur Store-and-Forward semplifichi di molto la gestione delle reti, esso introduce una problematica che prende il nome di **accodamento** (queueing). È una problematica che esiste in tutte le reti e si manifesta quando il **tasso di arrivo dei pacchetti è superiore al tasso di trasmissione in uscita**. Nei router e negli switch, i pacchetti si accodano in aree di memoria apposite dette **buffer**; un pacchetto rimane nel buffer fino a quando non verrà trasmesso.

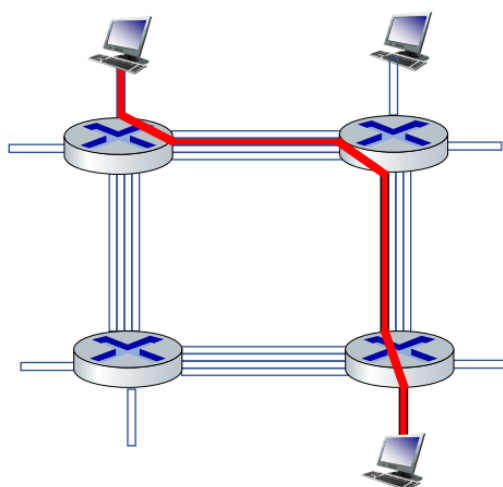


Questa è una condizione che può accadere nelle reti a commutazione di pacchetto, tuttavia **non può essere una situazione sistematica**: se si verificasse costantemente, la dimensione del buffer **crescerebbe costantemente** fino a raggiungere la massima dimensione possibile; da quel momento in poi ogni pacchetto in arrivo porta a una condizione di **buffer overflow** e andrebbe perso. Quindi, quali sono i problemi che provoca l'accodamento?

- **Buffer overflow** dei buffer dove vengono salvati i pacchetti ancora da trasmettere e susseguente perdita dei pacchetti in arrivo
- **Ritardo di accodamento** dato dall'attesa che il router trasmetta il pacchetto

1.4 Circuit Switching

La commutazione di pacchetto non è l'unico tipo di commutazione esistente; anzi essa storicamente è posteriore ad un'altro tipo di commutazione che prende il nome di **commutazione a circuito**



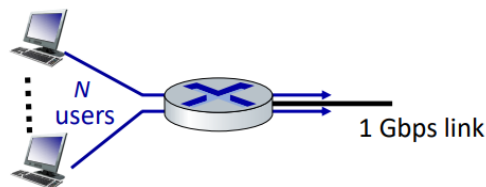
Questo tipo di commutazione segue un principio diverso da quella a commutazione di pacchetto: l'elemento fondamentale di questo tipo di rete è il **circuito** (non esistono i pacchetti in questo tipo di rete). Tra i vari **commutatori di circuito** si possono stabilire un certo numero di circuiti. L'obiettivo di questo tipo di commutazione è **destinare i circuiti alla comunicazione tra gli utenti della rete**. Le risorse di un circuito vengono **assegnate in maniera esclusiva ad un host** e non possono essere condivise con altri host. Il vantaggio di questo tipo di commutazione è **l'assenza di accodamento** data dal completo assegnamento delle risorse di un circuito ad una sola comunicazione tra sorgente e destinazione. Viene chiamato **circuito end-to-end** l'insieme di tutti i circuiti che vengono stabiliti tra sorgente e destinazione. Uno svantaggio di questo tipo di commutazione è la **necessità di una fase di setup** in cui vengono allocate le risorse dei circuiti per andare a creare il circuito end-to-end.

1.4.1 Packet Switching vs Circuit Switching

In una commutazione di circuito, le risorse vengono allocate solamente alla comunicazione tra sorgente e destinazione e non esistono problemi di accodamento. Tuttavia, l'utilizzo delle risorse di rete in questo tipo di comunicazione risulta **subottimale** rispetto ad una rete a commutazione di pacchetto. Facciamo un esempio:

example:

- 1 Gb/s link
- each user:
 - 100 Mb/s when "active"
 - active 10% of time



Domanda: quanti utenti, in queste condizioni, possono rispettivamente accomodare una rete a commutazione di circuito e una rete a commutazione di pacchetto?

- **Circuit-switching:** 10 utenti
- **Packet-switching:** con 35 utenti, la probabilità che più di 10 utenti siano attivi allo stesso tempo è minore di 0.0004

Quindi una rete a commutazione di pacchetto è sempre la scelta migliore?

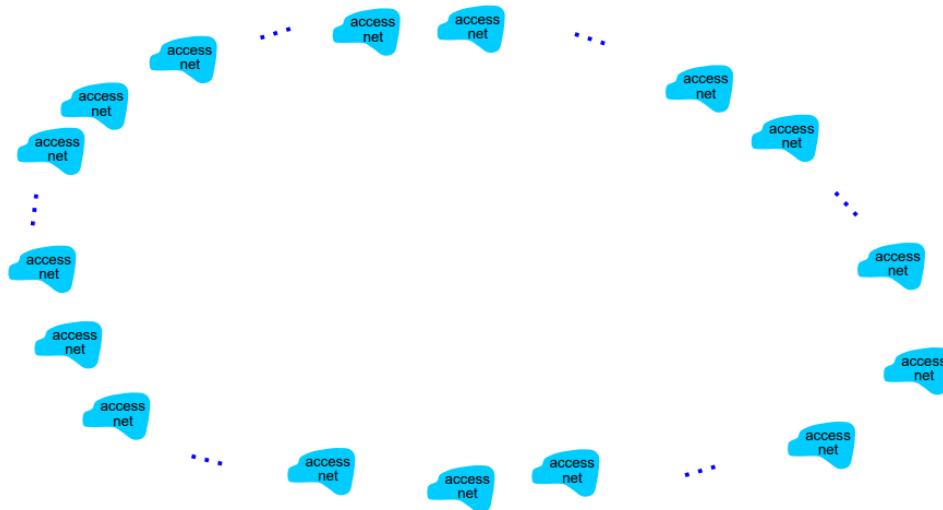
- Essa è ottima per un traffico di tipo "**bursty**" (a raffica), cioè in situazioni dove a volte ci sono dati da inviare, a volte no
- Permette la condivisione delle risorse di rete
- Non richiede setup

Tuttavia, se si creano condizioni sfavorevoli, si vanno a creare delle **situazione di congestione eccessiva della rete**, andando a creare situazioni di ritardo nella trasmissione dei pacchetti e di buffer overflow. Si rendono quindi necessari **protocolli di trasmissione affidabili** e meccanismi di **controllo della congestione**. È però possibile, visti i vantaggi delle reti a commutazione di circuito, fornire lo stesso tipo di garanzia del servizio anche nelle reti a commutazione di pacchetto? La risposta è sì;

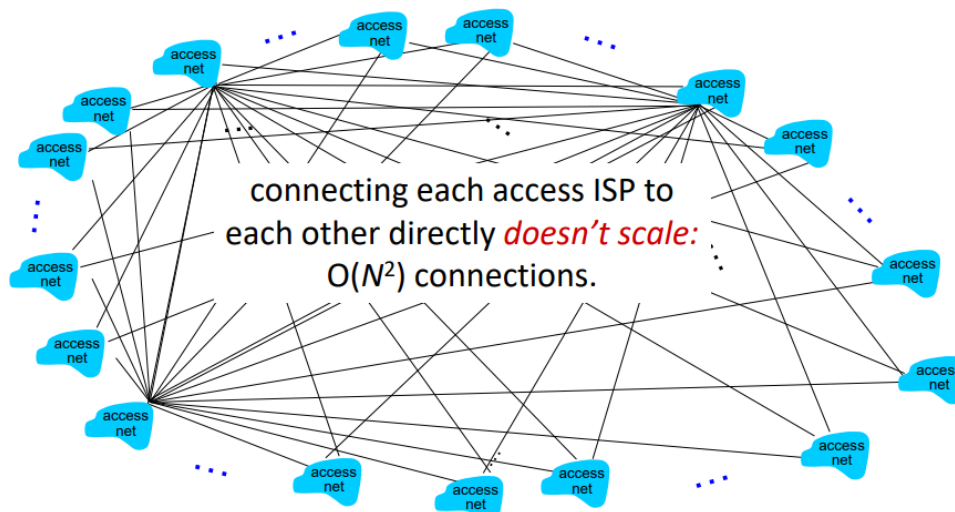
esistono delle tecniche che permettono di **emulare la commutazione di circuito sulle reti a commutazione di pacchetto**, tuttavia sono casi parecchio difficili da gestire.

1.5 Struttura di internet nel dettaglio

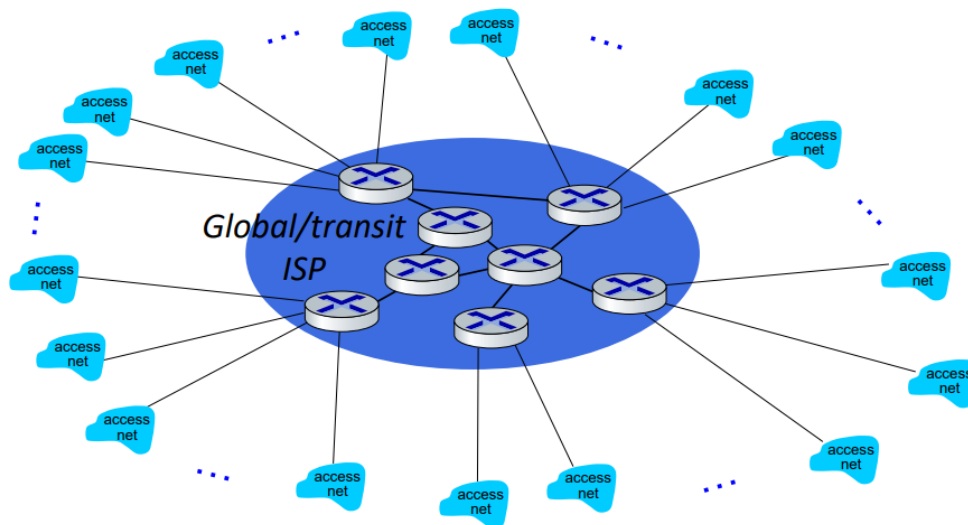
Gli host sono connessi a internet tramite le **reti di accesso** fornite da ISPs. Le reti di accesso devono per forza essere **interconnesse** per garantire che possa avvenire la comunicazione tra qualsiasi due host della rete (internet è una rete **connessa**, cioè ogni nodo è raggiungibile da tutti gli altri nodi). Il risultato dell'evoluzione di internet è una **struttura gerarchica**; questa evoluzione, tuttavia, non è stata guidata da **necessità di tipo tecnico** ma di tipo **economico e politico**. Vediamo quindi la struttura di internet passo passo: al mondo abbiamo **milioni** di reti di accesso



L'idea più semplice per interconnetterle è **connettere ogni ISP agli altri in maniera diretta**, tuttavia...



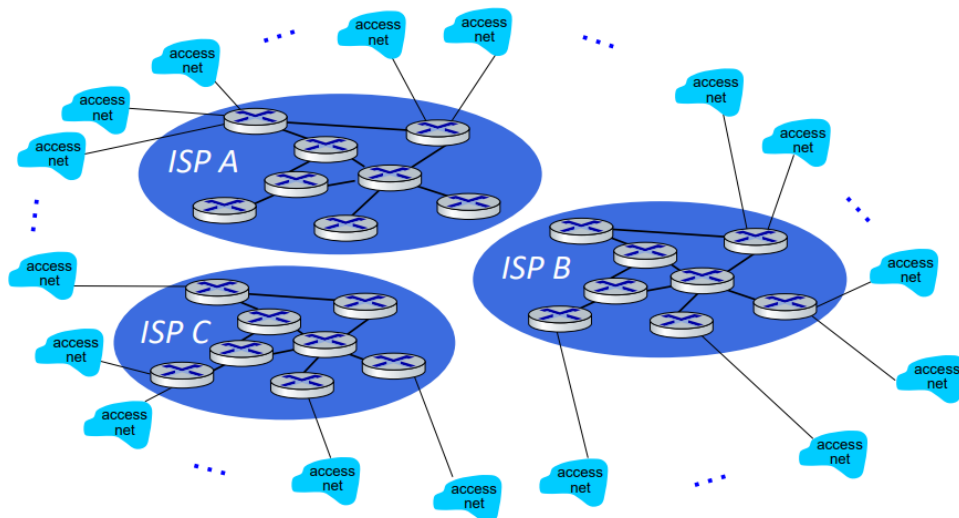
Una soluzione alternativa è quella di avere un **ISP globale** (o di transito) con una rete geograficamente estesa in tutto il mondo, i cui router sono **interconnessi** e che fornisce connettività alle reti di accesso:



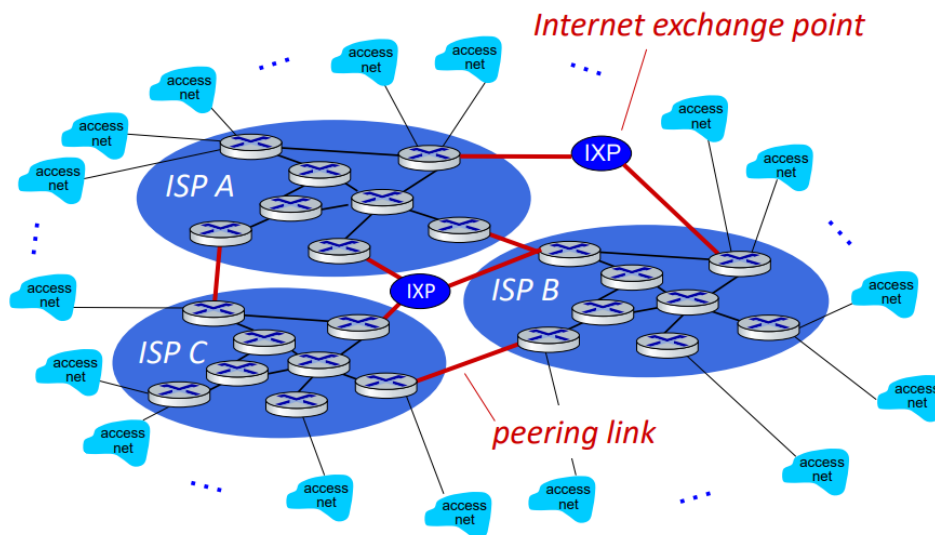
Questo approccio tuttavia ha dei problemi:

- Richiede una rete estesa **su tutto il globo**, in modo che possa servire ogni rete di accesso
- Richiede un accordo economico tra gli ISP locali e quello globale
- Perché ci si dovrebbe limitare ad un solo ISP globale? In effetti, ci potrebbe essere concorrenza fra essi

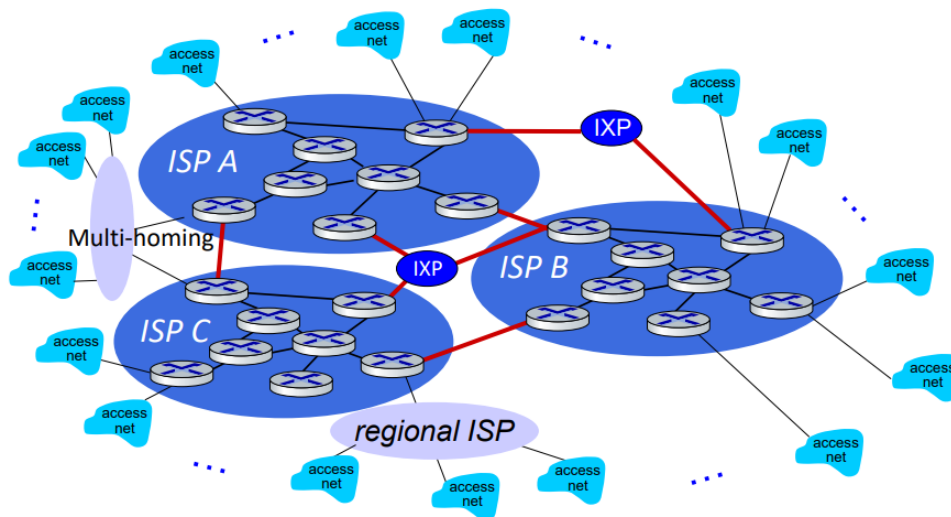
In virtù dell'ultimo punto sopra, si è andata a creare una situazione di questo tipo:



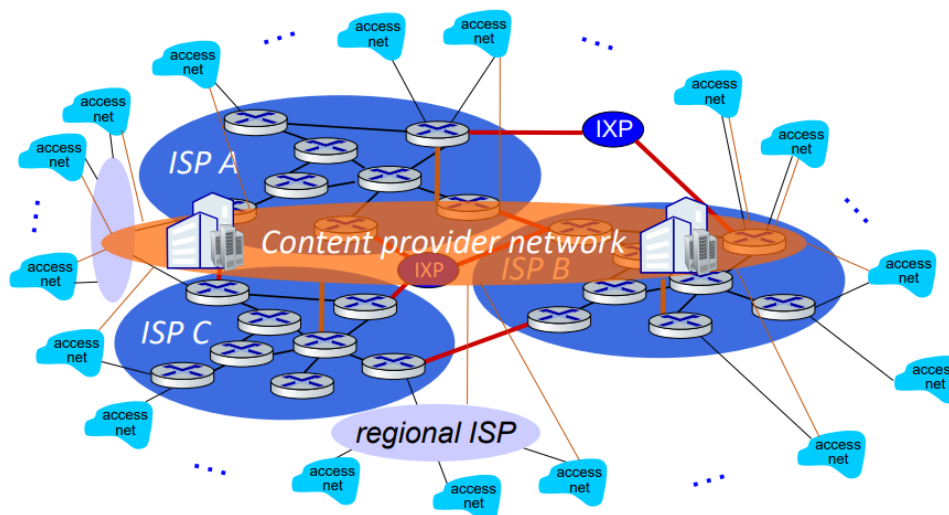
si sono andati quindi a creare degli ISPs **geograficamente estesi** che coprono determinate aree del globo. Questo genere di ISPs prendono il nome di **Tier 1 ISPs**. A questo punto, gli ISPs globali devono creare dei **peering links** (chiamati così perché **non sono il frutto di un accordo economico ma di un accordo tra pari**) per creare un'interconnessione tra di loro:



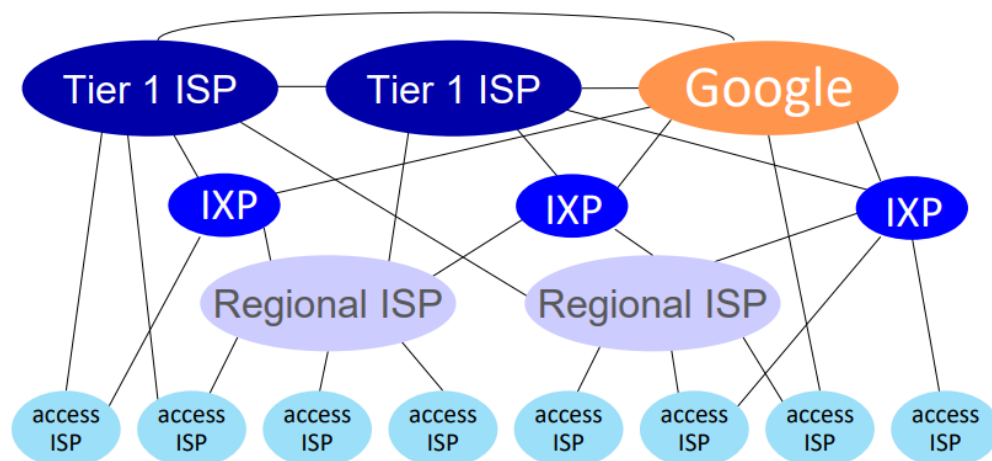
Tuttavia, c'è anche un'altra possibilità, cioè quella di avere degli **Internet Exchange Points** (IXPs), i quali sono dei nodi a cui gli ISP's globali si connettono e che garantiscono la connessione tra di essi. Tuttavia, tipicamente le reti di accesso non si **interfacciano direttamente con gli ISP's globali** ma passano tramite **ISP's regionali**, che hanno una diffusione più capillare sul territorio. Altro tipo modo in cui le reti di accesso accedono agli ISP's globali è tramite **multi-homing**, cioè una rete di accesso potrebbe avere **più collegamenti verso un ISP's globale o regionale**; questo approccio garantisce **resilienza**



Infine, abbiamo le **reti dei content provider**, che hanno lo scopo di **fornire contenuto agli utenti**. Per farlo, molto spesso, esse **bypassano gli ISP's globali** e si interfacciano direttamente con le reti di accesso.



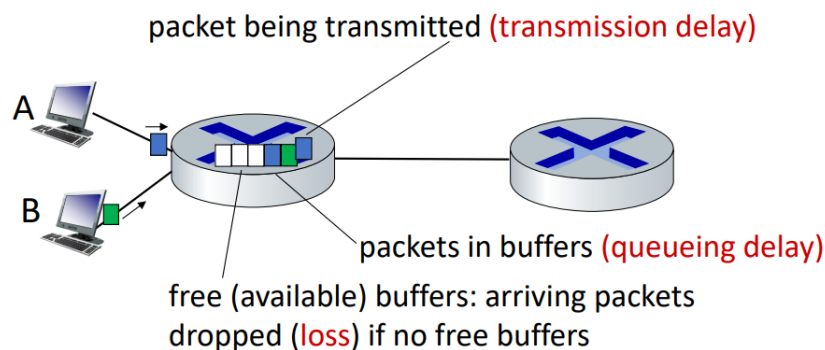
Nulla però vieta alle reti dei content provider di accedere anche alle reti degli ISPs globali. Diamo una versione più generale della gerarchia:



Tuttavia, le connessioni possibili **possono anche non limitarsi a quelle mostrare in figura.**

1.6 Metriche di performance nelle reti

Il ritardo e la perdita sono due delle metriche fondamentali per capire la prestazione della rete. Abbiamo già parlato di **ritardo di accodamento** e di **ritardo di trasmissione**, tuttavia essi sono solo due dei tipi di ritardo che si possono verificare.



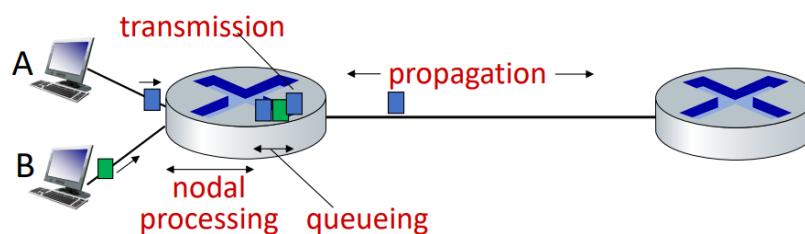
Tuttavia ce ne sono delle altre, vediamole tutte:

- **Ritardo di elaborazione** (d_{proc}): quando un pacchetto arriva ad un nodo, devono essere effettuate delle operazioni fondamentali, per esempio **l'analisi della tabella di inoltramento per capire su quale collegamento trasmettere il pacchetto** (lookup). Altra operazione è il **controllo dei bit di errore**: a volte, per colpa di distorsioni o "rumore" sul canale, certi bit di un pacchetto possono essere cambiati (da 0 a 1 e viceversa); il pacchetto quindi risulta malformato. Esistono meccanismi che permettono di **individuare se c'è stato un errore** (e anche di ricostruire il pacchetto originale). Questi metodi sono detti di **controllo e correzione dell'errore** e richiedono del tempo per essere eseguiti, tendenzialmente nell'ordine dei **microsecondi** ($10^{-6}s$).
- **Ritardo di accodamento** (d_{queue}): è il tempo che il pacchetto attende per essere trasmesso. Dipende dal livello di congestione della rete. È tipicamente nell'ordine dei millisecondi
- **Ritardo di trasmissione** (d_{trans}): Se abbiamo un pacchetto di lunghezza L che vogliamo trasferire su un collegamento con tasso di trasmissione R , allora il ritardo di trasmissione è dato da:

$$d_{trans} = \frac{L}{R}$$

- **Ritardo di propagazione** (d_{prop}): Il ritardo di propagazione è il tempo che necessita un pacchetto per **propagarsi da un capo all'altro del collegamento**. Questo ritardo dipende dalla lunghezza del collegamento fisico d (espressa in **metri** (m)) e dalla **velocità di propagazione** s , che è nell'ordine di grandezza della **velocità della luce**: $\sim 2 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$, e si calcola nel seguente modo:

$$d_{prop} = \frac{d}{s}$$



Il **ritardo totale del nodo** (ritardo **end-to-end**) d_{nodal} è calcolato come la somma di tutti ritardi visti sopra:

$$d_{nodal} = d_{proc} + d_{queue} + d_{trans} + d_{prop}$$

esso è uno delle **metriche più importanti** e mi permette di valutare le prestazioni della rete. Per calcolare il ritardo ent-to-end bisognerebbe anche tener conto dei **ritardi introdotti dai sistemi periferici**, che tuttavia non considereremo per questi appunti.

1.6.1 Ritardo di accodamento e intensità di traffico

Il ritardo di accodamento ha una caratteristica particolare: mentre tutti gli altri ritardi sono **analoghi** se considero lo stesso pacchetto trasmesso in due momenti diversi, **per il ritardo di accodamento non è così**. Il ritardo di accodamento dipende dallo stato della rete durante la trasmissione. Questo ritardo di solito viene studiato tramite **metodi statistici**: in particolare, il ritardo di accodamento dipende da un valore che viene chiamato **intensità di traffico** ("traffic intensity"):

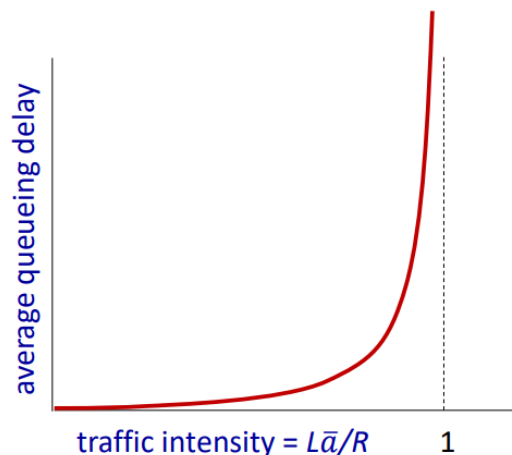
$$\frac{L \cdot \bar{a}}{R} = \frac{\text{tasso di arrivo dei pacchetti (bit/s)}}{\text{tasso di uscita dei pacchetti (bit/s)}}$$

Dove:

- \bar{a} è il **tasso di arrivo medio dei pacchetti** (pacchetti/s)
- L è la **lunghezza** dei pacchetti (bit/packet)
- R è la **larghezza di banda** del collegamento (bit/s)

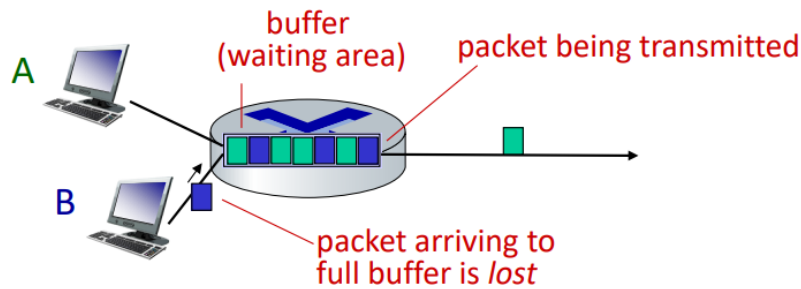
L'intensità di traffico è **adimensionale** ed è una quantità non negativa:

- Se l'intensità di traffico è **vicina a 0**, allora il ritardo di accodamento medio sarà piccolo
- Se l'intensità di traffico è **vicina a 1**, allora il ritardo di accodamento medio è grande
- Se l'intensità di traffico è **maggiore di 1**, allora il tasso di arrivo dei pacchetti è **troppo alto rispetto alla capacità della rete di smaltirli**, quindi il tempo di accodamento medio è **potenzialmente infinito**



1.6.2 Perdita di pacchetti

Un'altra metrica di performance fondamentale è la **perdita di pacchetti**; infatti, idealmente essa dovrebbe essere **nulla**. La perdita di pacchetti si verifica quando si ha un buffer overflow sul buffer di accodamento di un nodo. La perdita di pacchetti può essere mitigata tramite **meccanismi di ritrasmissione dei pacchetti** da parte del nodo sorgente (tuttavia non è obbligatorio che avvenga).



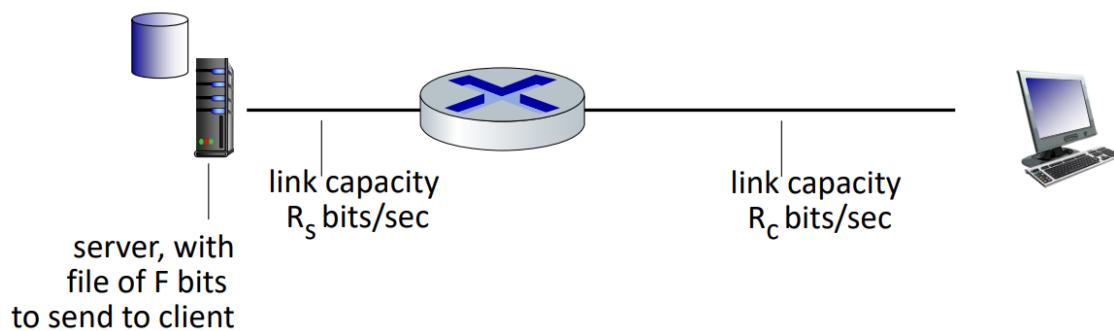
Oltre alla perdita per accodamento, i **pacchetti possono essere scartati dai commutatori** se ci sono stati troppi errori durante la trasmissione oppure se non è previsto un meccanismo di correzione degli errori.

1.6.3 Throughput

Il **throughput** è il **tasso a cui i bits vengono inviati dal mittente al destinatario**; si calcola in bit/s e viene a volte chiamato **throughput end-to-end**. Come si fa a calcolare il throughput?

- **Throughput istantaneo:** tasso di invio **ad un certo punto nel tempo**
- **Throughput medio:** tasso di invio medio **su un lungo periodo di tempo**; si può ottenere facendo la media di tutti i valori istantanei o nel seguente modo: supponiamo di voler trasferire un file F dal punto A al punto B; allora il throughput sarà la dimensione del file diviso il tempo che ha impiegato il file ad essere trasferito

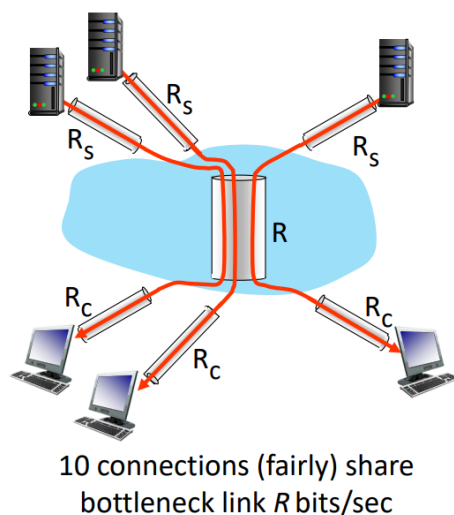
Il throughput è una metrica di prestazione "quanto bene" la rete sta andando nella comunicazione tra un mittente ed un destinatario.



Si possono verificare vari casi:

- Se $R_s < R_c$ allora il throughput medio sarà R_s . In questo caso, **non si causerà mai accodamento nel commutatore**
- Se $R_s > R_c$ allora il throughput medio sarà R_c . In questo caso, potrebbe essere possibile che i **pacchetti si accodano nel commutatore**

In ogni caso, il throughput è vincolato dal collegamento con capacità minore, il quale prende il nome di **bottleneck link**. Vediamo questo ulteriore scenario: supponiamo di avere 10 client e 10 server e che essi, per comunicare, passino attraverso un collegamento all'interno della network core con larghezza di banda R :



In questo caso, il throughput end-to-end per connessione risulta il minimo tra R_c , R_s , e $R/10$, cioè $\min\{R_c, R_s, R/10\}$. Nella pratica, tuttavia, la rete di core ha larghezze di banda **molto maggiori rispetto ai collegamenti degli hosts**, quindi $R/10$, il più delle volte, sarà comunque molto maggiore di R_s e R_c . Ciò significa che, molto spesso, il bottleneck è dato dai collegamenti di accesso.

1.7 Strato protocollare e modelli di servizio

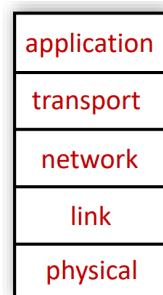
Le reti sono dei sistemi molto complessi con diverse componenti che interagiscono fra loro

- Hosts
- Routers
- Collegamenti di diverso tipo e scopo
- Applicazioni
- Protocolli
- Hardware e Software

C'è allora un modo intelligente per **strutturare e discutere le reti**? Un modo è una **struttura a strati**, in cui ogni servizio viene implementato tramite **azioni interne allo strato** e ogni servizio fa affidamento ai servizi **appartenenti al livello sottostante per implementare le proprie operazioni e garantirne il funzionamento**. Inoltre, i vari strati sono **indipendenti l'uno dall'altro**, nel senso che, in caso di modifiche a come vengono implementati i servizi in uno strato, gli altri strati **non vengono influenzati dalla modifica**. L'approccio a strati quindi permette di approcciarsi alla modellazione e alla discussione di sistemi complessi:

- La sua **struttura esplicita** permette l'identificazione e le **relazioni fra le varie componenti del sistema**. Crea inoltre un **modello di riferimento a strati** per la discussione
- Permette la **modularizzazione** del sistema e quindi rende più semplice l'aggiornamento e la manutenzione di questo
 - I cambiamenti nell'implementazione dei servizi di uno strato sono **trasparenti al resto del sistema** e quindi non lo influenzano

Ciò che è stato definito per internet prende il nome di **pila (o stack) protocollare di internet** e prevede l'esistenza di 5 diversi strati, numerati dal basso verso l'alto:

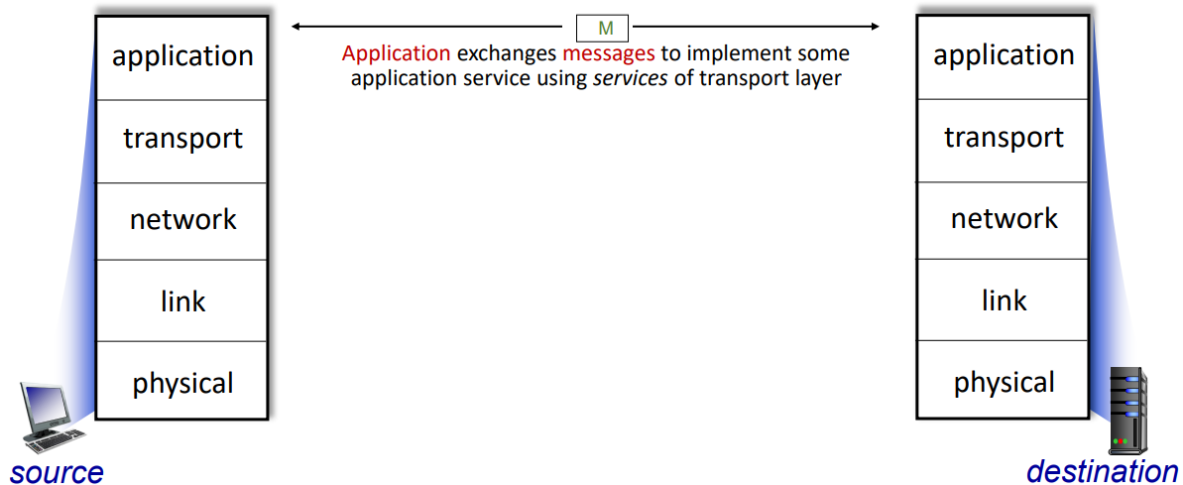


Vediamoli nel dettaglio:

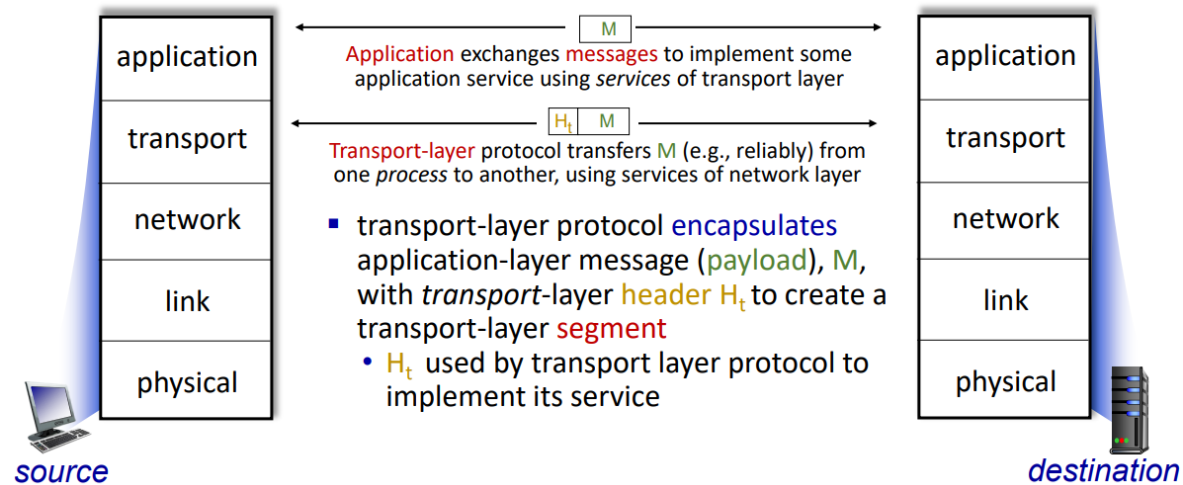
- **LIVELLO 5: APPLICATIVO:** Tutti i protocolli volti al supporto alle applicazioni di rete (HTTP, SMTP, DNS ecc..)
- **LIVELLO 4: TRASPORTO:** Ha il compito di effettuare un trasferimento di dati tra macchine che si trovano su reti differenti. Esempio di protocolli a questo livello sono TCP e UDP
- **LIVELLO 3: RETE:** Offre il servizio fondamentale di **instradamento** tra sorgente e destinazione. Protocollo fondamentale a questo livello è **Internet Protocol (IP)**
- **LIVELLO 2: COLLEGAMENTO:** Ha il compito di trasferire i dati tra **due entità di rete adiacenti**, cioè su un collegamento. Protocolli a questo livello sono, per esempio, Ethernet e 802.11(WiFi).
- **LIVELLO 1: FISICO:** Trasporto fisico dei bit su un cavo (o canale radio)

1.7.1 Servizi, Stratificazione e Incapsulamento

Come si può andare ad implementare i vari protocolli che garantiscono il funzionamento dei servizi ad ogni livello? Un concetto fondamentale da introdurre a questo scopo è quello dell'**incapsulamento**: le applicazioni si devono scambiare messaggi per realizzare i propri servizi, e per farlo devono basarsi sui servizi offerti dal **livello di trasporto**



Il messaggio viene quindi passato al livello di trasporto, il quale **aggiunge un'intestazione** (**operazione di incapsulamento**) che va ad implementare il servizio a livello di trasporto:



A sua volta, il livello di trasporto usa i servizi del livello di rete, quindi passerò il nuovo **segmento** al livello di rete:

