

# **Computer Network Architecture**

## **计算机网络体系结构**

沈航

南京工业大学



Email: [hshen@njtech.edu.cn](mailto:hshen@njtech.edu.cn)

# About this course ...

## COURSE OBJECTIVE:

- 深入理解计算机网络体系结构；
- 掌握计算机网络体系结构的分层模型、关键协议和算法；
- 了解现代计算机网络技术的发展趋势；
- 学习开展计算机网络研究的基本方法。

# About this course ...

## COURSE OBJECTIVE:

- 主要内容：
  - ➡ OSI体系结构
  - ➡ TCP/IP 协议体系
  - ➡ 新型网络及网络新技术
  - ➡ 网络性能分析与评价方法
  - ➡ Web与多媒体通信

# About this course ...

**Textbook教材:** **None**

# About this course ...

**The primary lecture material will be drawn from references and some of the recent networking research literature.**

# About this course ...

## Selected Journals

- ☞ **IEEE/ACM Transactions on Networking**
- ☞ **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**
- ☞ **IEEE Communications Letters**
- ☞ **IEEE Transactions on Wireless Communications (TWC)**
- ☞ **IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC)**

# About this course ...

## Selected Journals

- ☞ 计算机学报
- ☞ 软件学报
- ☞ 通信学报
- ☞ 电子学报
- ☞ 计算机研究与发展

# About this course ...

## Selected Conferences

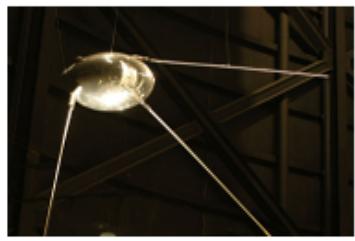
- **ACM SIGCOMM**
- **ACM MOBICOM**
- **IEEE INFOCOM**
- **IEEE GLOBECOM**
- **IEEE/ACM MASCOTS**

# 60~70年代：基本理论的形成

- 出于冷战的需要
- 核心概念是存储转发和分组交换
  - 改变了传统的通信网络电路交换的概念
  - 出现了动态路由的概念
- 原型系统：APRANET（1969年）

# 互联网早期发展

美苏争霸  
在核打击下能够通信的是什么？

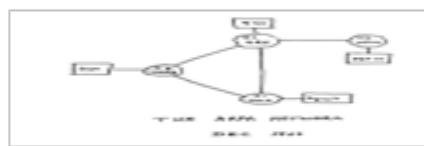


斯普特尼克1号



国防高级研究计划局

四个节点  
UCLA/SRI/UCSB/Utah



ARPANET诞生

- 1972年底：24个站点
  - 美国国防部DARPA、基金委NSF以及UCLA、UCSB等高校
- 80年代中期
  - Internet横跨北美、欧洲和澳大利亚，成为全球性网络
- 国防系统的实验，如何扩大研究范畴吸引更多研究者？

1957年10月  
苏联发射成功  
第一颗人造卫星

1958年2月  
美国成立国防高级研  
究计划局 (**ARPA**)

1969年8月  
ARPANET诞生，**创新地**  
**采用了分组交换技术**

1983年  
ARPANET采用  
TCP/IP

1990年  
ARPANET退役  
移交基金委NSF

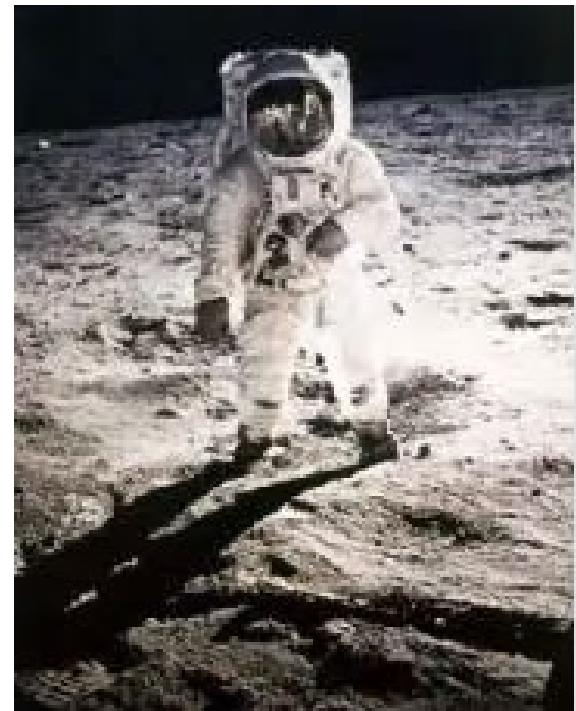
标志着互联网诞生

# 互联网诞生50年

- 1969年7月16日，美国阿波罗11号飞船从卡纳维拉尔角肯尼迪航天中心点火升空，开始了人类首次登月的太空征程。
- 1969年10月29日，加州大学洛杉矶分校与斯坦福研究院之间的两个节点连通，实现了分组交换网络的远程通讯，但只传送了几个字符！

# 互联网诞生50年

- 互联网诞生在当年远没有阿波罗登月轰动！
- 美国宇航员尼尔·奥尔登·阿姆斯特朗驾驶着宇宙飞船跨过38万公里的征程，承载着全人类的梦想踏上了月球表面。



# 互联网诞生50年

“这是个人迈出的一小步，但却是人类迈出的一大步！”

----尼尔·奥尔登·阿姆斯特朗

1969年7月20日



*Neil Alden Armstrong*  
*1930.8.5 — 2012.8.25*

13

# 互联网诞生50年

- 但50年后的今天看来，互联网技术改变了人类认识世界的方式，对人类的生活和工作产生了更为深远的影响！



# 互联网诞生50年



远程医疗



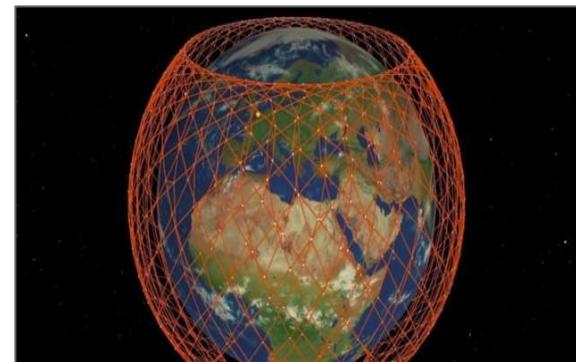
无人码头的远程操控



通信大数据行程卡



矿井下网络监控与通信



马斯克的星链计划StarLink

异构网络环境  
有线、无线；距离远近；干扰各异

业务需求各异  
时延、带宽、可靠性、安全保密.....

## 多种多样的网络服务



# 互联网诞生50年

行业互联网



物联网

金融互联网

能源互联网

工业互联网

互联网+ ?

应用支撑技术



云计算

智慧城市

三网融合

大数据

人工智能

计算系统

互联网

(下一代互联网/未来互联网)

底层通信技术



3G/4G/5G



WiFi

超高速光纤



## 互联网成为网络空间的核心

# 互联网诞生50年

## ➤ 诞生阶段的启发

- 有战略背景和传统技术无法解决的**重大需求**
- **分组交换的理论突破**和**原型系统实验并举**
- 有政府的不断支持：从1969开创至今

## ➤ 成长壮大阶段

- **简单实用的技术路线TCP/IP诞生和发展**
- 教育和科研的示范网络为**起点**：  
具有实验物理学的研究特点
  - ARPAnet、NSFNET、ANS、vBNS
- **联合协作的开放式研究**：IETF/RFC
- 在不断试错中快速成长壮大

### 互联网诞生的两种说法

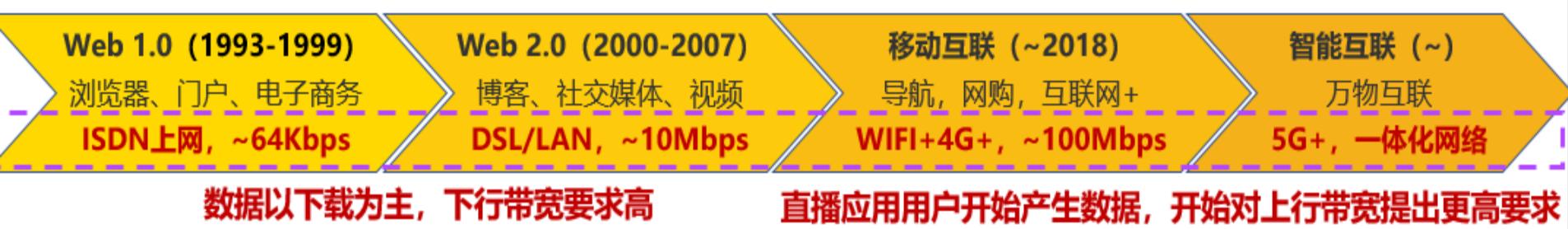
- 1、1969年ARPANET诞生
- 2、1983年ARPANET采用TCP/IP



互联网诞生50周年之际，清华大学于2019年在北京承办网络领域顶会  
ACM Sigcomm

# 互联网诞生50年

- 1993年Mosaic浏览器诞生，  
开启了互联网广泛商用之路
- 94年万维网联盟W3C成立
- 互联网进入高速发展期：  
雅虎、AOL、谷歌、亚马逊、  
EBay、Netflix、腾讯，阿  
里，百度，京东
- 95年NSFnet退役，转商业，  
网景上市，达29亿美元
- Netscape/微软IE世纪之争
- 2000年，互联网泡沫  
破灭，进入低调发展阶  
段
- Myspace、Skype、  
Safari, Facebook,  
Twitter, youtube,  
土豆, youku
- 2007年，3G+iPhone，  
谷歌收购安卓，即将进  
入移动互联
- 各种应用：Uber,  
airbnb, 滴滴，抖音，  
头条，美团，拼多多...
- 云为基础的互联网平台
- 新技术爆发：高速网络，  
云，SDN，大数据/AI，  
VR/AR
- 2010年，4G LTE部署
- IoT
- 车联网
- 5G+进入  
各行业



# 互联网诞生50年

商业需求是核心驱动力，技术创新提供重要基础

- 有远见的**企业**参与并不断投入： MCI、IBM、Qwest, CISCO.....
- 有线=>无线=>广覆盖：便捷程度决定了用户使用方式和在线时间
- 网络性能决定了应用体验，成了互联网应用发展的必要条件
- 网络带宽决定了应用能传什么：  
文本=>图片（静图->动图）=>音频=>视频（低清->高清，短视频->直播）
- **网络性能提升、延迟降低**：快速响应？可靠性？计算、存储、传输的互换？





# 全球市值前十名公司的变迁



美国PK日本



硅谷在哪里?  
美国西部荒凉的湾区

我辈中人?

- a) 苹果、谷歌、微软、亚马逊、腾讯、FB突破5千亿美元
- b) 阿里、伯克希尔哈撒伟、强生、摩根

祝贺大家：计算机类荣登最热门专业榜首

# 60~70年代：基本理论的形成

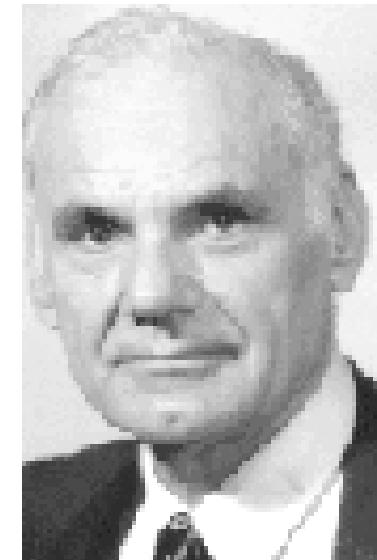
1969: ARPANET, the first **packet-switched network** 分组交换网 developed by Defense Advanced Research Projects Agency, USA

# 60~70年代：基本理论的形成

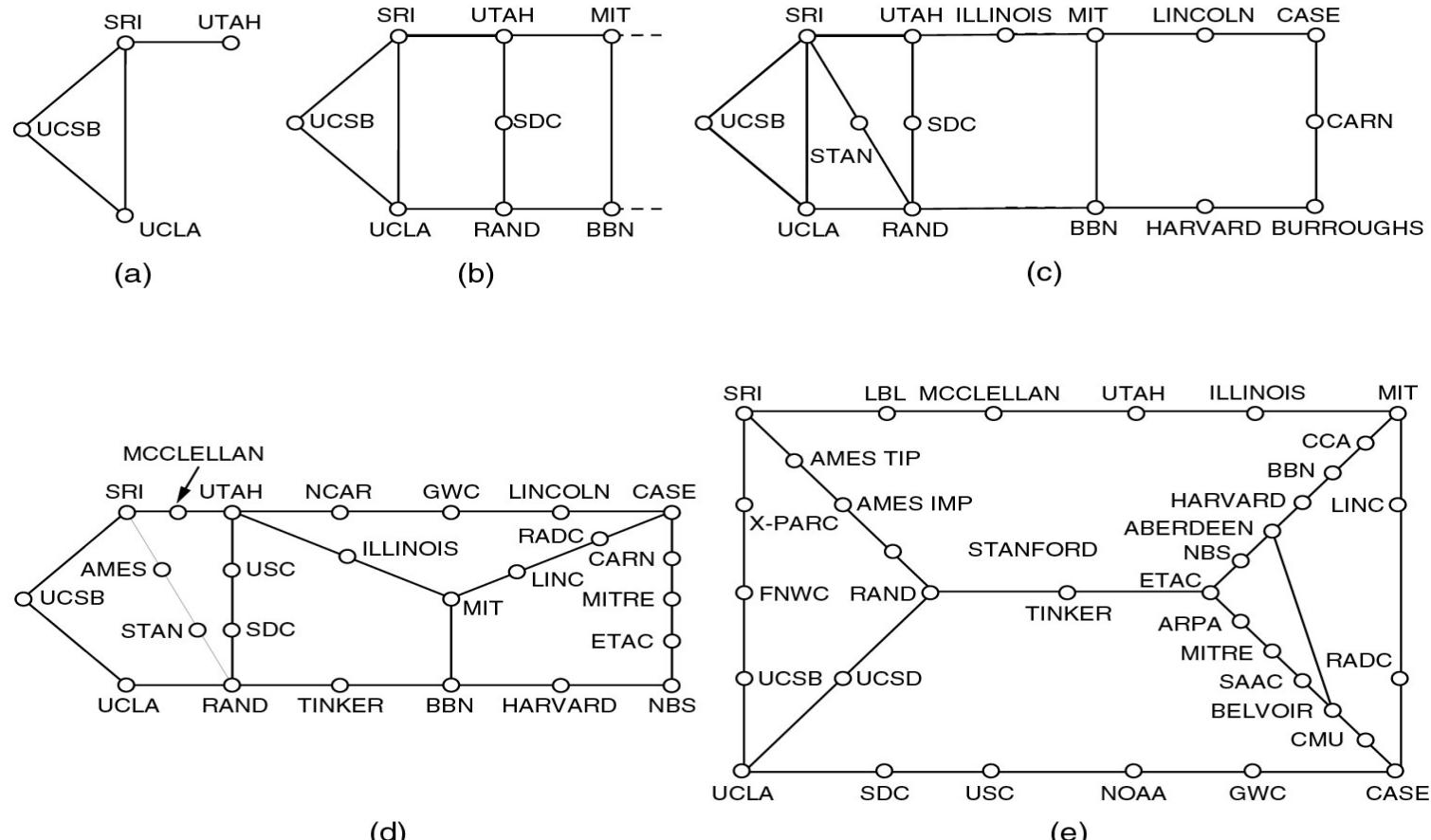
**Lawrence G. Roberts—**

**One of the leading founders of the basic technical basement of Internet - packet-switched network**

**He was responsible for the design, initiation, planning and development of ARPANET, the world's first major packet network, the predecessor to Internet,**



# The ARPANET



Growth of the ARPANET (a) December 1969. (b) July 1970.  
 (c) March 1971. (d) April 1972. (e) September 1972.

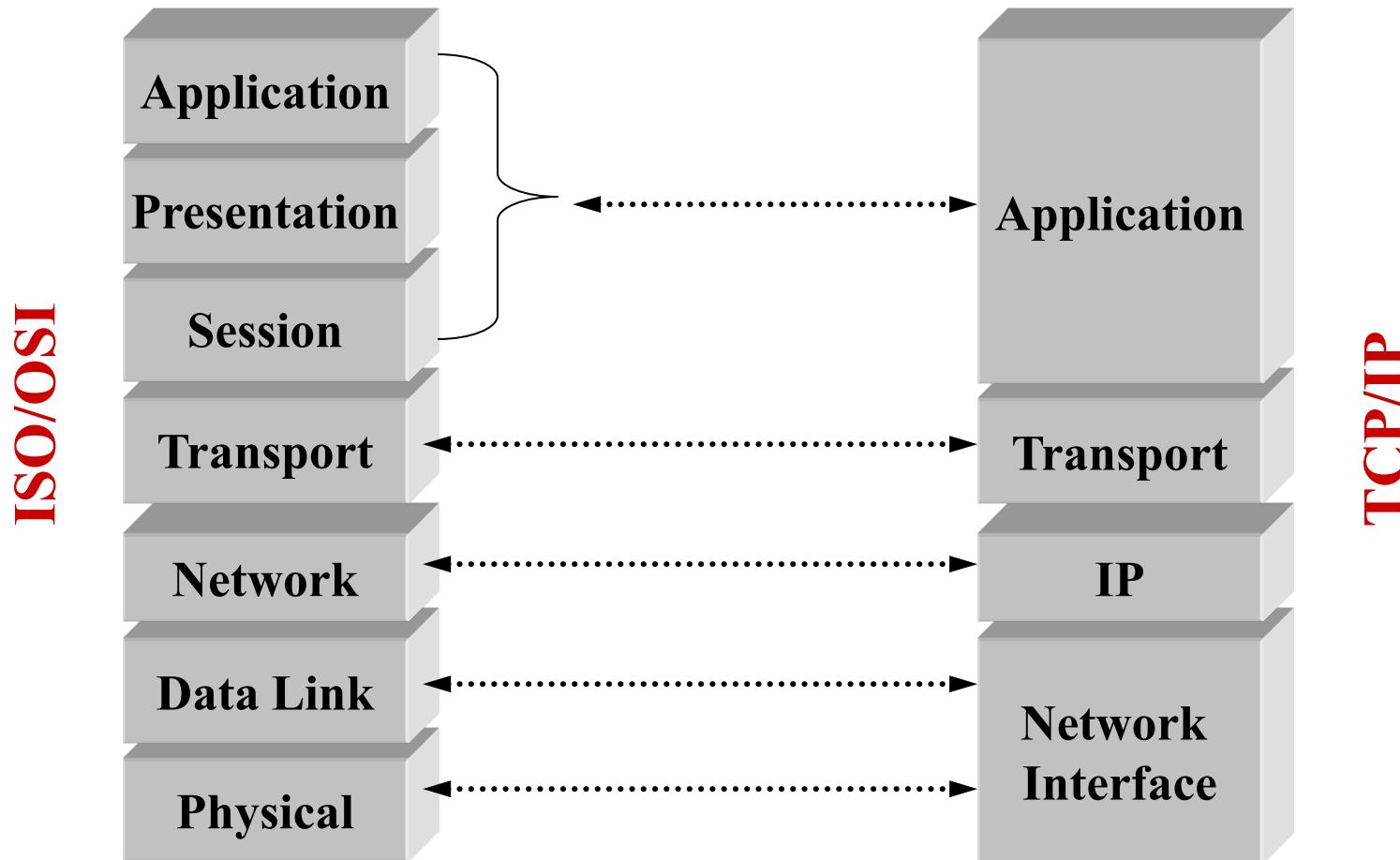
# 70~80年代：开放型体系结构的形成

- 工业化的需要
  - 技术趋于成熟：从研究对象转向应用工具
  - 种类繁多：产品的兼容性
- 网络互连的需要
  - 自身的分布式特性
- 原型系统：ARPANET, INTERNET

# 网络系统分层

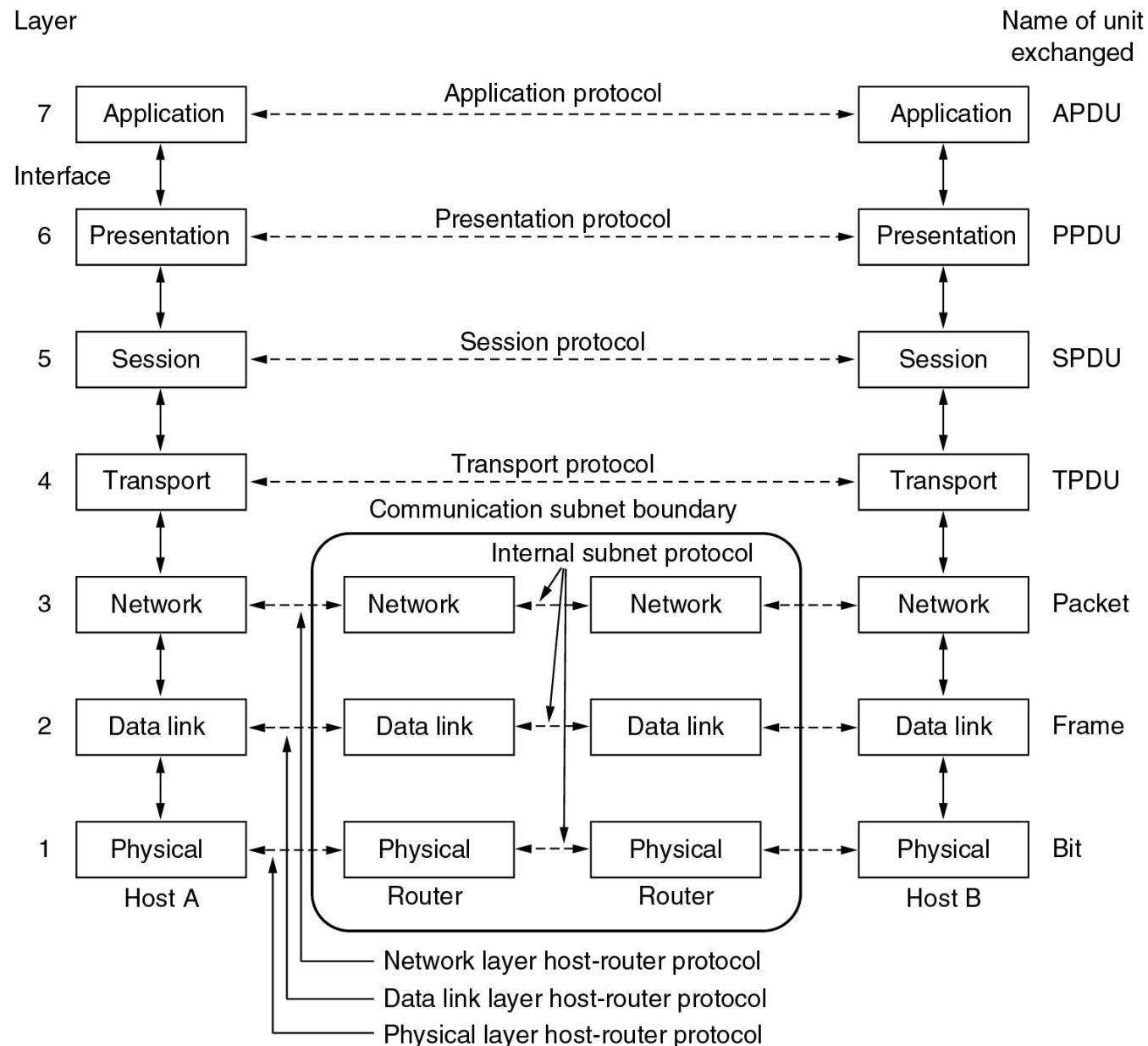
- 1974年，IBM宣布分层的网络体系结构SNA (System Network Architecture)。
- 1977年，ISO提出开放系统互连参考模型OSI (Open Systems Interconnection)-----七层协议的体系结构。

# 70~80年代：开放型体系结构的形成



ISO: (International Organization for Standardization) 国际标准化组织

# The ISO/OSI Reference Models



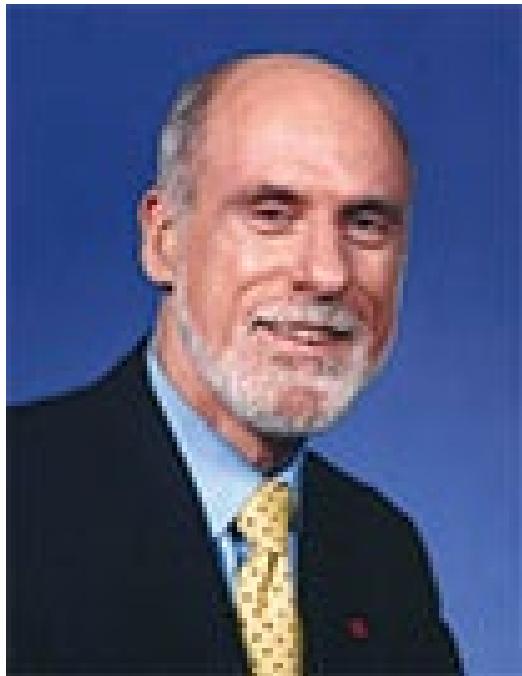
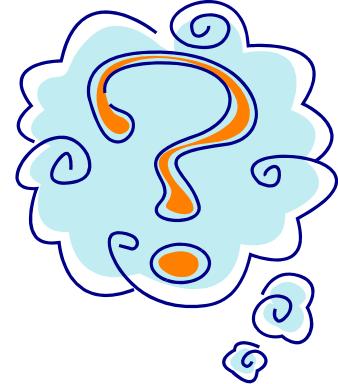
# 网络系统分层

- 相互通信的两台计算机的系统必须高度协调工作，而这种“协调”是相当复杂的；
- “分层”的目的是将庞大而复杂的问题转化为若干较小的，易于研究，处理的局部问题；

# The Internet

- The Internet is linked by a broad array of electronic, wireless, and optical networking technologies.
- The Internet carries an extensive range of information resources and services

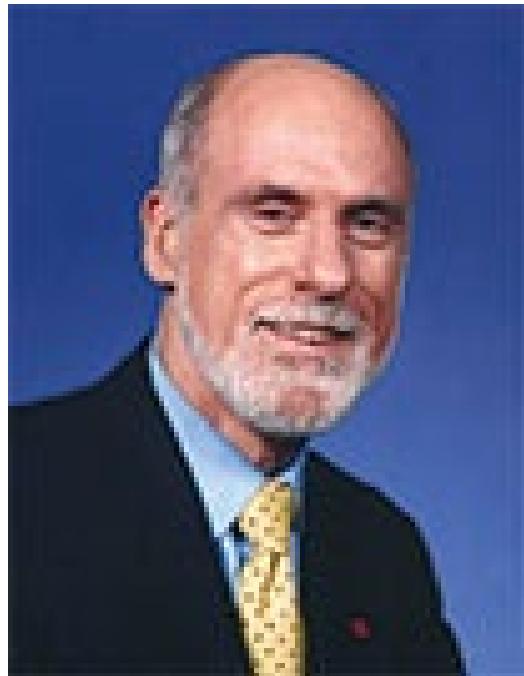
# What is the Internet



**Dr. Vinton Cerf,  
Co-Creator of TCP/IP**

- The Internet is the largest network of networks in the world,
  - ♠ using TCP/IP protocols and packet switching .
  - ♠ running on any communications substrate.

# What is the Internet



**Dr. Vinton Cerf,  
Co-Creator of TCP/IP**

- 互联网发明人之一，  
ACM图灵奖获得者
- ACM (Association for  
Computing Machinery)  
president
- Vice President of Google

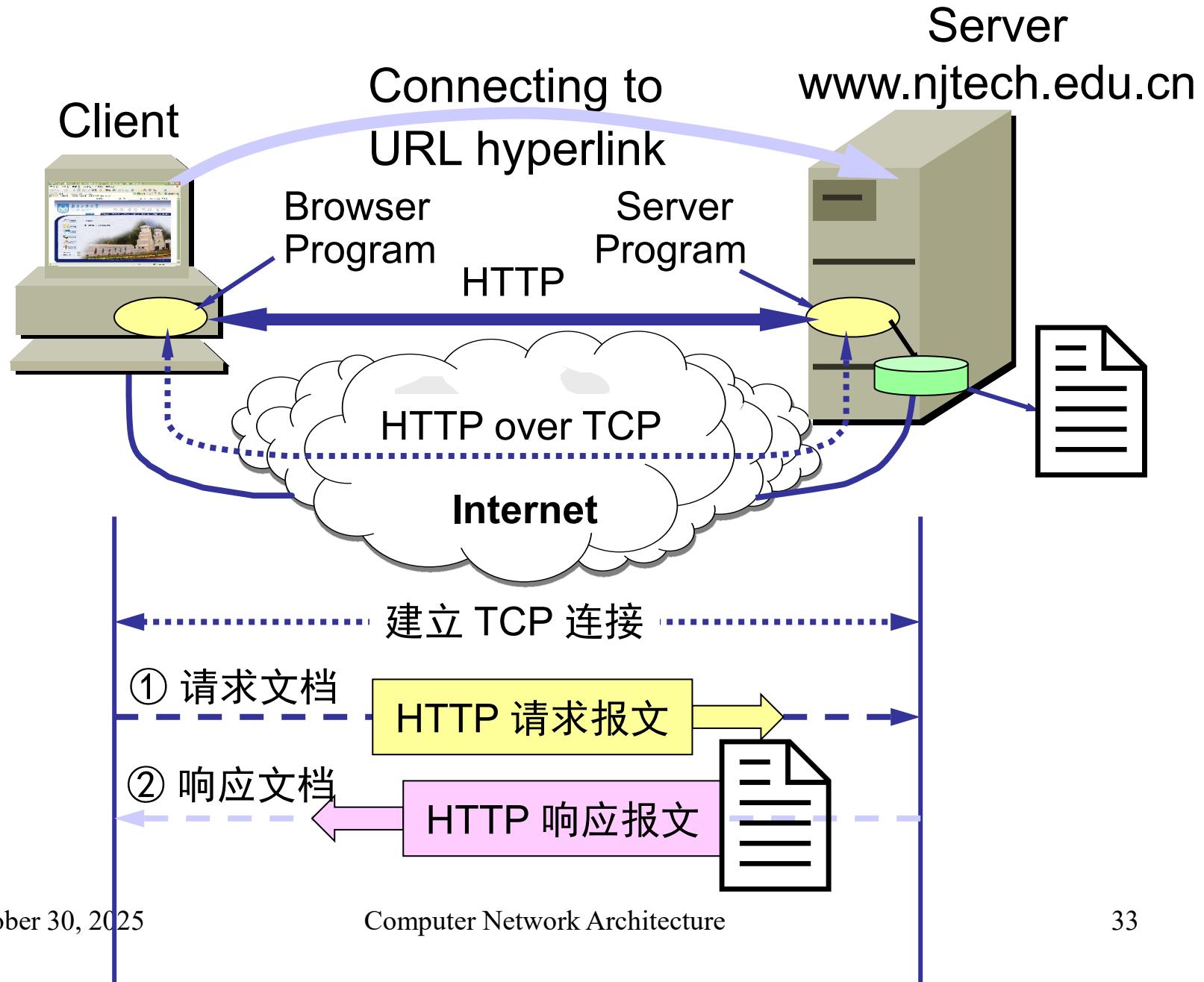
# 互联网技术

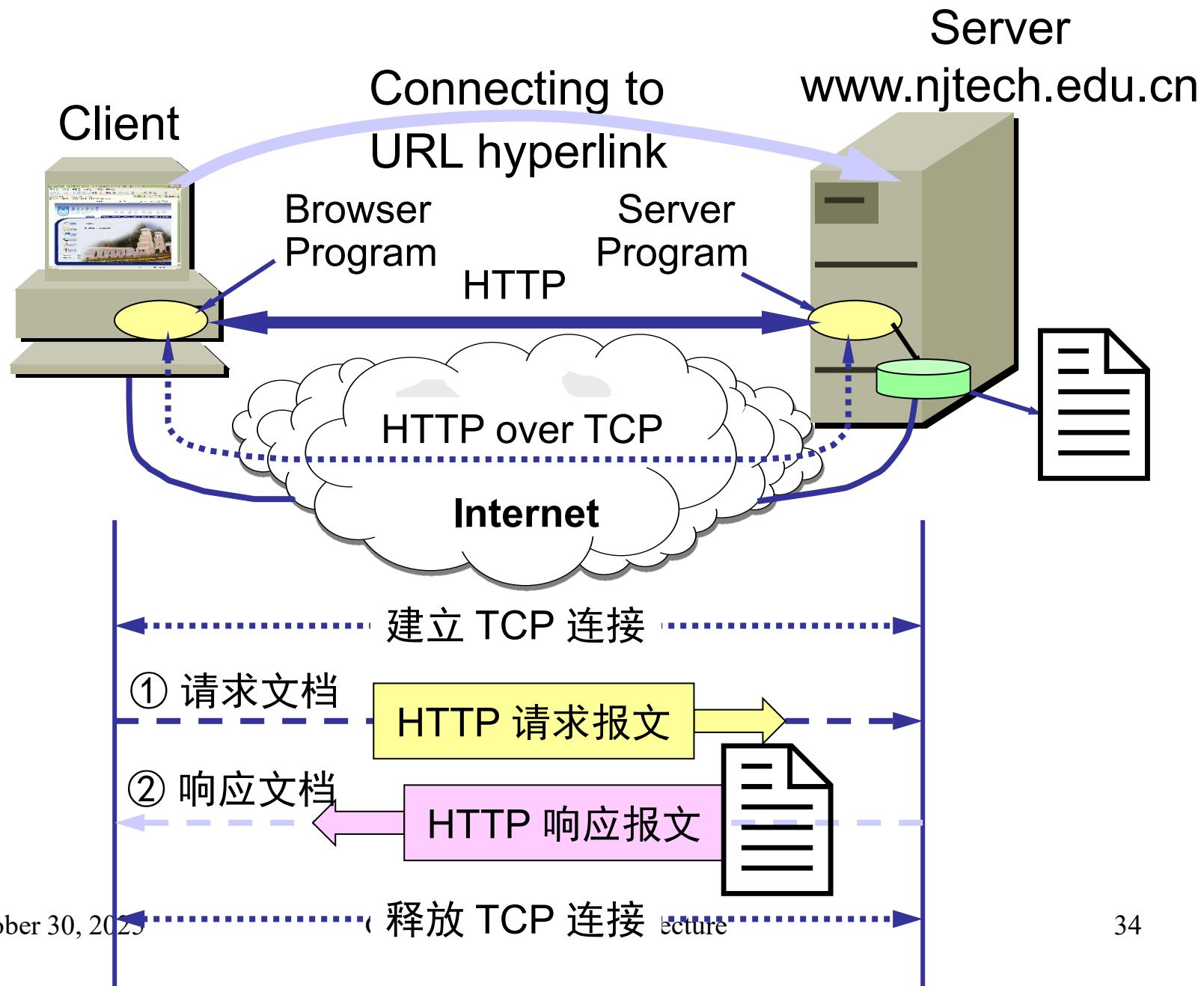
1989年夏天， Tim Berners-Lee提出客户机/服务器模式，开发出了世界上第一个Web服务器和第一个Web客户机。



Tim Berners-Lee

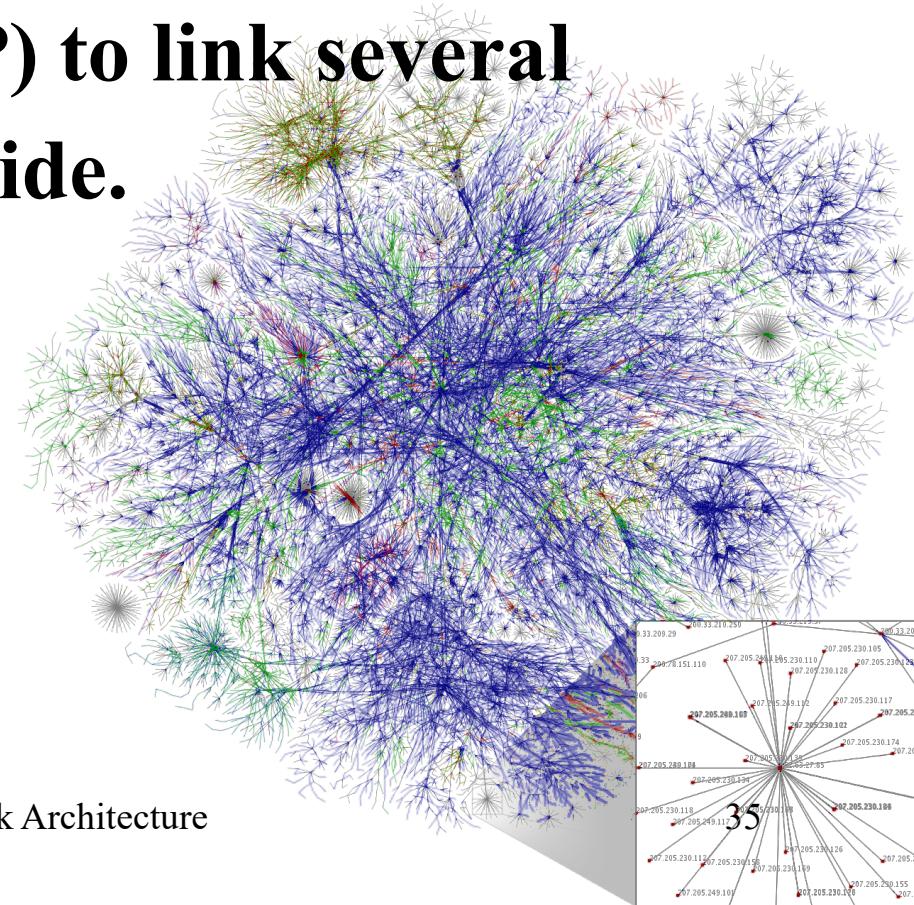
1989年12月，定名为：  
**World Wide Web (WWW)**





# The Internet

- **a global system of interconnected computer networks that use the standard Internet protocol suite (TCP/IP) to link several billion devices worldwide.**

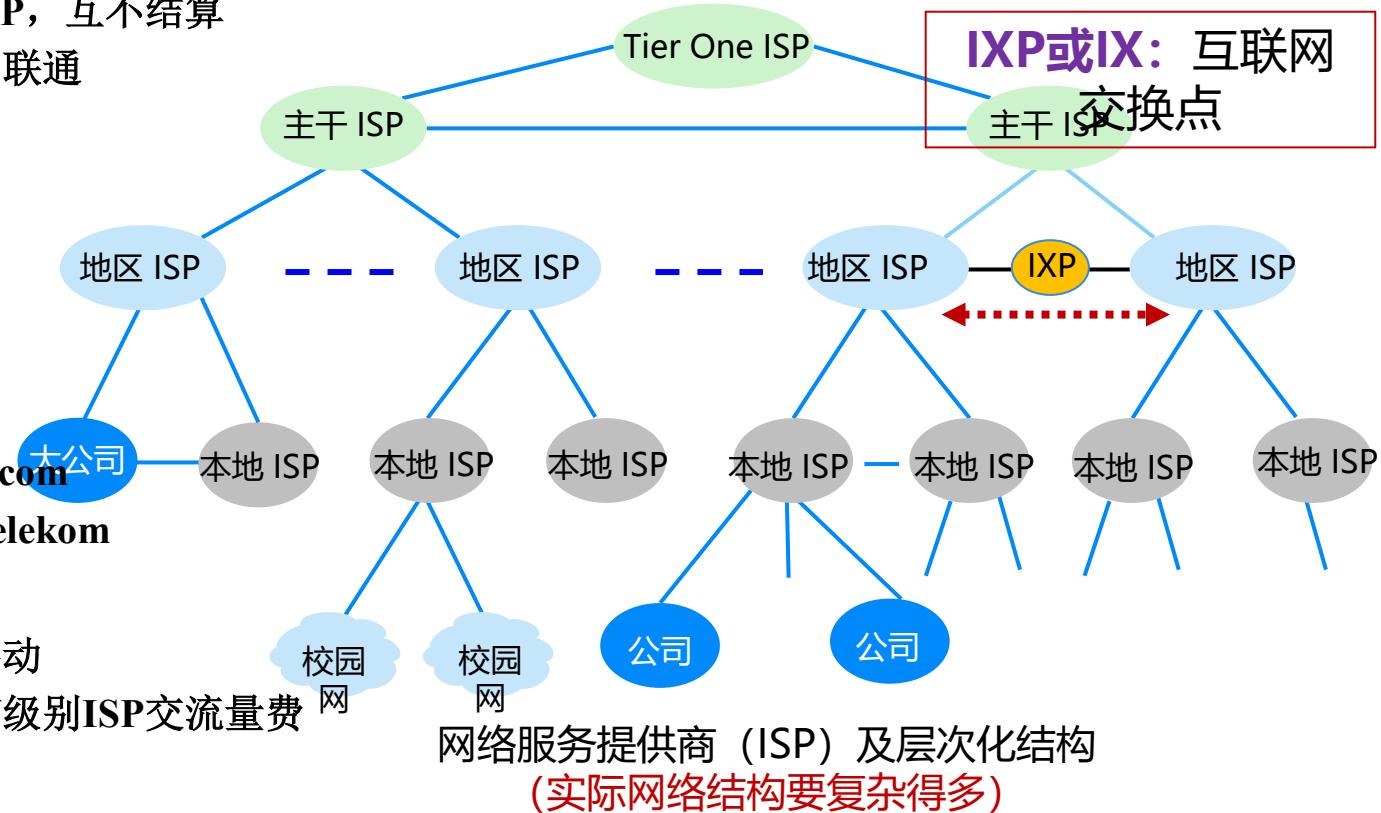


# 互联网的层级结构

a)

## Tier-1 ISP

- 全球最高级别ISP，互不结算
- 中国电信、中国联通
- 美国AT&T
- 美国Verizon
- 美国Sprint
- 日本NTT
- 日本KDDI
- 新加坡SingTel
- 英国British Telecom
- 德国Deutsche Telekom



b)

## Tier-2 ISP

- 教育网、中国移动
- 往往需要向更高级别ISP交流量费

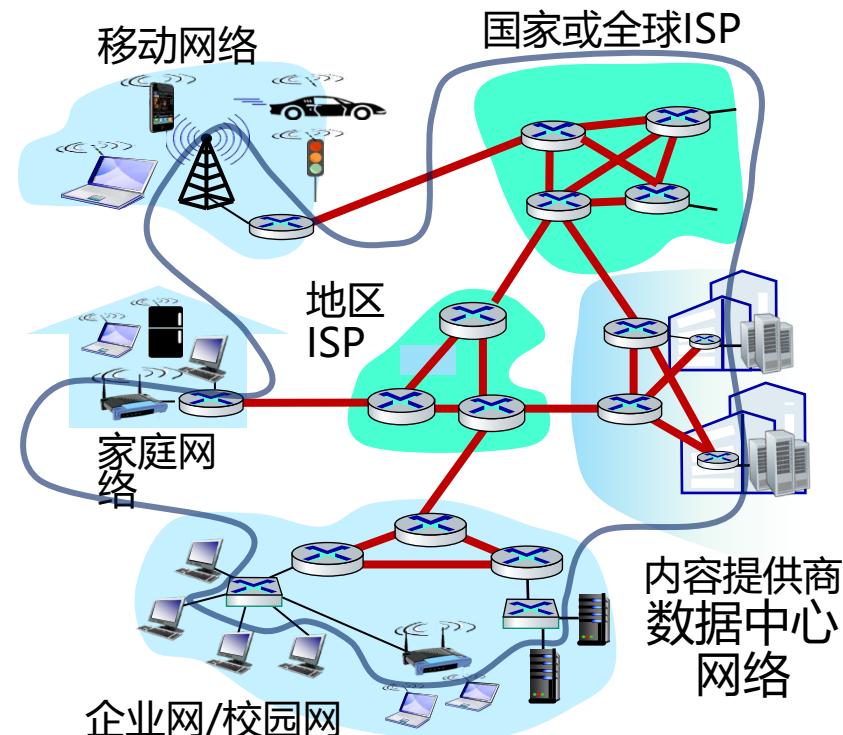
# 互联网的构成

## a) 网络边缘

- 端系统：位于互联网边缘与互联网相连的计算机和其他设备
- 端系统由各类主机(host)构成：  
桌面计算机、移动计算机、服务器、其他智能终端设备

## b) 网络核心

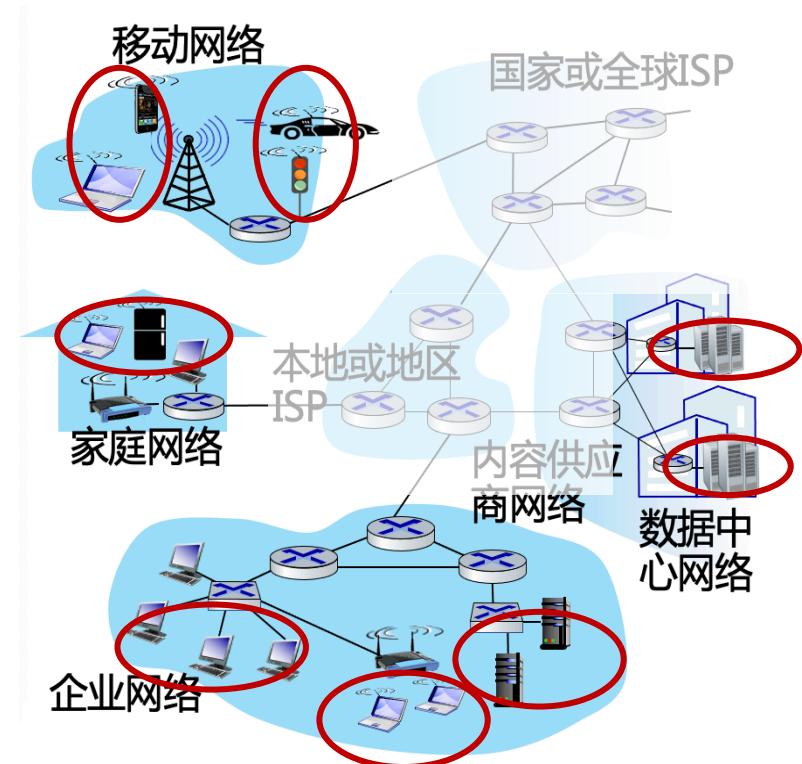
- 由互联端系统的分组交换设备和通信链路构成的网状网络
  - 分组交换（路由器、链路层交换机）
  - 通信链路(光 $\otimes$ 铜缆、无 $\square$ 、激光链路)



# 网络边缘

## a) 主机Host

- 客户端：便携机、智能手机、平板电脑，智能手环等各类智能终端
  - 服务器（服务器通常位于数据中心）
- 主机的功能
- 容纳（即运行）应用程序
  - 产生信息并向接入网发送数据
  - 从网络接收数据并提供给应用程序





# 网络边缘设备

各式各样的“主机”（Host）



智能音箱



IP相框



AR 眼镜



起搏器和监护仪



安全摄像头



自行车



智能手环



烤面包机



感应床垫



智能汽车



能源监测器



互联网冰箱

# 接入网概述

a)

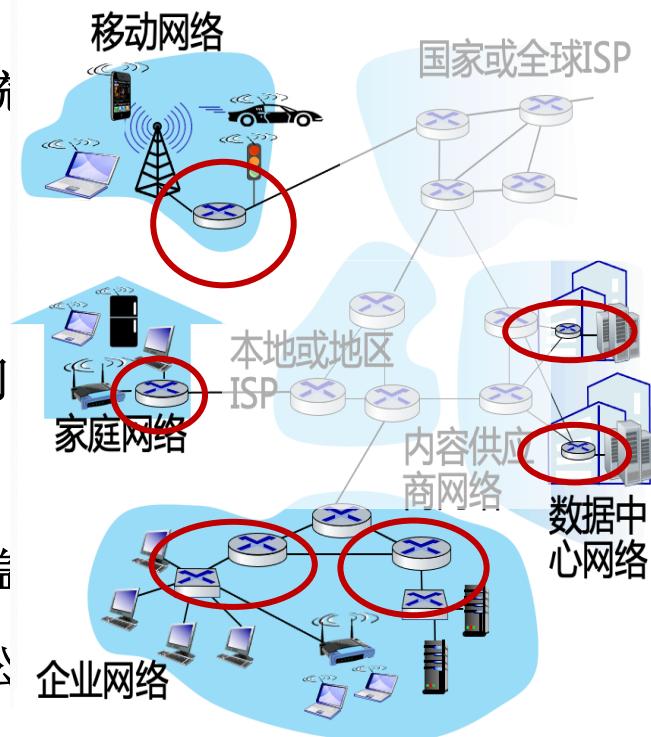
## 接入网目标

- 接入网的目标是将主机连接到边缘路由器上
- 边缘路由器是端系统Host去往任何其他远程端系统的路径上的第一台路由器

b)

## 如何将终端系统连接到边缘路由器？

- 有线网络接入技术：光纤到户FTTH，以太网，同轴电缆，双绞线的DSL，古老的拨号上网
- 无线网络接入技术： WiFi、4G/5G，卫星广域覆盖
- 接入场景：住宅（家庭）接入网，机构（学校、公司）接入网，移动接入网络（WiFi、4G/5G）



各种异构网络通过边缘路由器接入



# 接入网：光纤到户FTTH

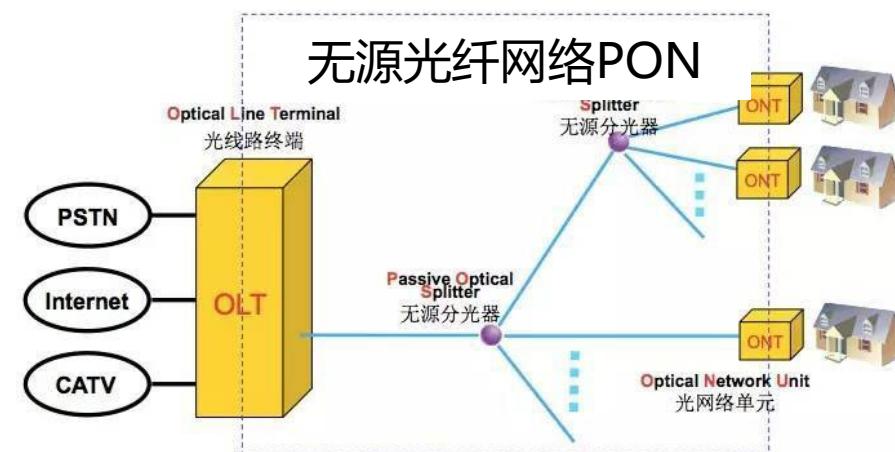
## a) 光纤到户FTTH

- FTTH: Fiber To The Home
- 我国及全球先进地区普遍采用的光纤通信的传输方法
- 分为两类：有源光纤网络AON和无源光纤网络PON
- 带宽大、线路稳定

我国FTTH用户  
已接近5亿

## b) 无源光纤网络PON

- PON: Passive Optical Network
- OLT: 局端的光线路终端
- ONU光网络单元（如光猫ONT）
- 光猫ONT通过一个或多个无源分光器，连接到局端的光线路终端OLT

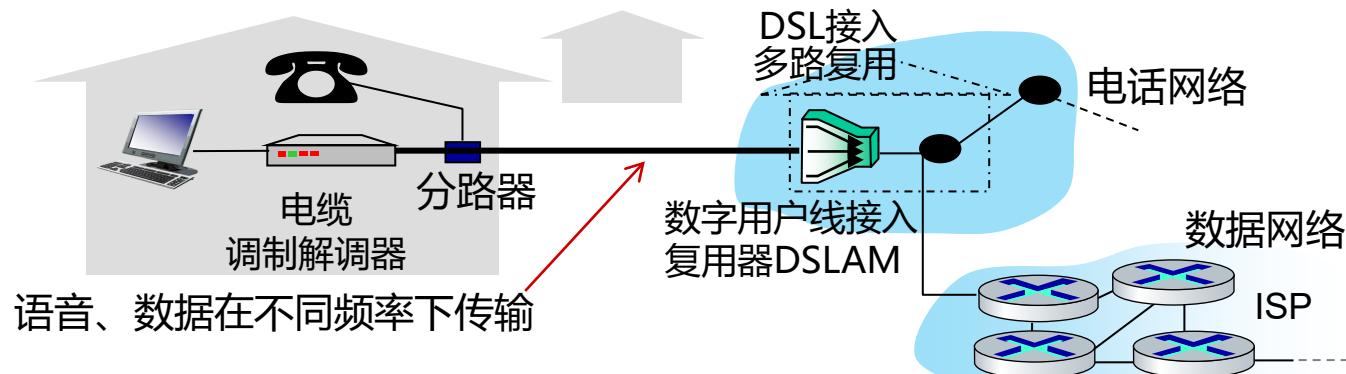




# 接入网：数字用户线DSL

- 数字用户线DSL: Digital Subscriber Line
- 使用电话线连接到数字用户线接入复用器(DSLAM)
  - DSL电话线上，语音和数据可以同时传输
  - 数据进入互联网，语音连接到电话网
- 上下行速率不对称
  - 24-52 Mbps下行速率，3.5-16 Mbps上行速率

我国已广泛升级为FTTH  
国外依然大量使用DSL ☺





# 接入网：同轴电缆

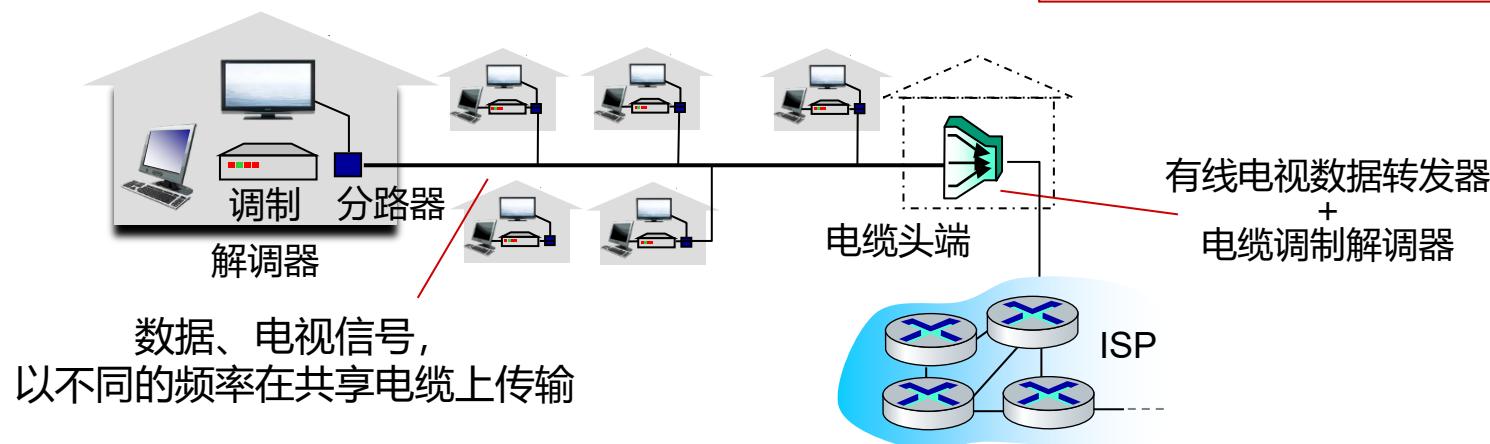
## a) 同轴电缆：Cable

- 家庭利用传统**有线电视信号线**（同轴电缆）接入头端上网
- 多个家庭共享有线电视的头端
- 不对称：高达40 Mbps–1.2 Gbps下行传输速率，  
30-100 Mbps上行传输速率

## b) 混合光纤同轴电缆HFC

- 先用同轴电缆接入光纤节点，再用光纤连接到头端

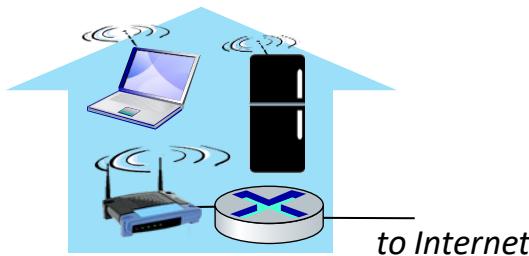
我国已广泛升级为FTTH，  
美国住宅依然有80%多使用  
DSL和同轴电缆接入 ☺



# 接入网：无线接入

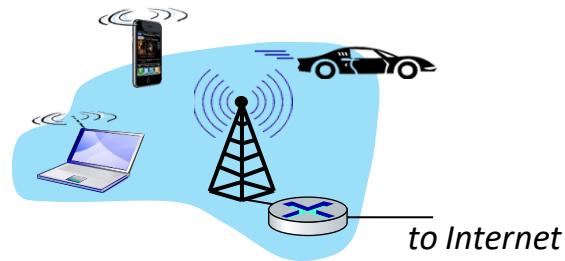
## 无线局域网 (WLAN)

- 通常在建筑物内或周围 (10米)
- 802.11b/g/n (WiFi) :  
11、54、450 Mbps等传输速率
- Wi-Fi 6最高速率可达9.6Gbps



## 广域蜂窝接入网

- 由移动蜂窝网络运营商提供 (10公里)
- 2G/3G/4G/5G等蜂窝网络
- 0.1 ~ 1000 Mbps速率



无线接入网通过基站(“接入点”)将终端系统连接到路由器上



# 接入网：企业和家庭网络

## a) 实际的接入网

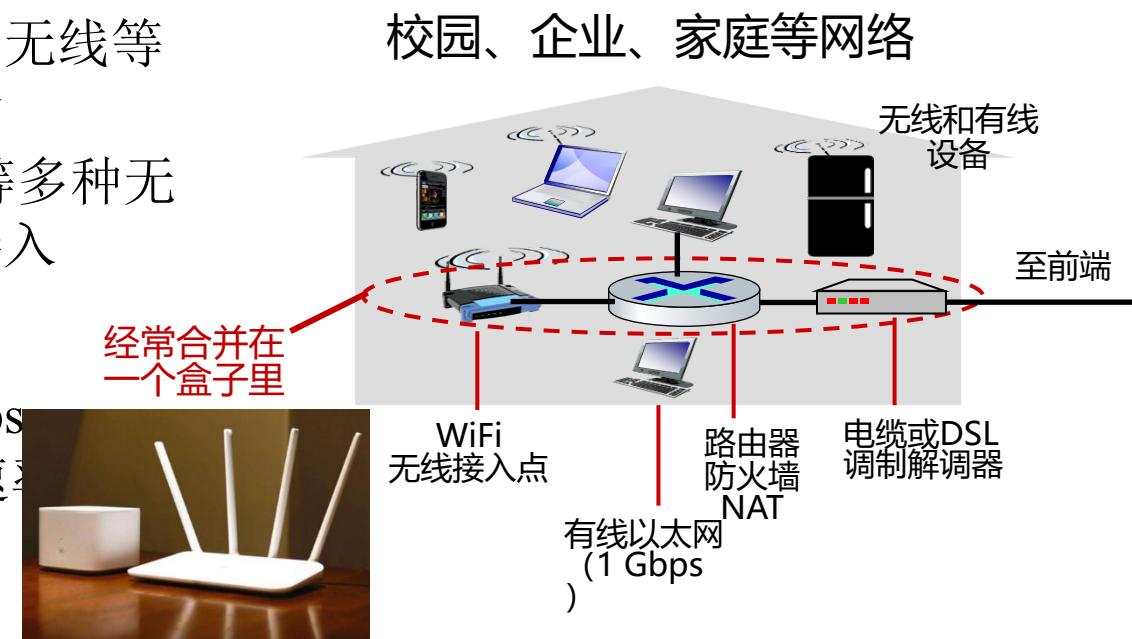
- 往往采用有线、无线等多种技术的混合
- 甚至WiFi和4G等多种无线技术的混合接入

## b) 有线以太网接入

- 100Mbps、1Gbps、10Gbps等接入速率

## c) 无线WiFi接入

- 11、54、450Mbps等



# What is an architecture?

- High level design principles that guide the technical design of a system, especially the engineering of its protocols and algorithms.

# What is an architecture?

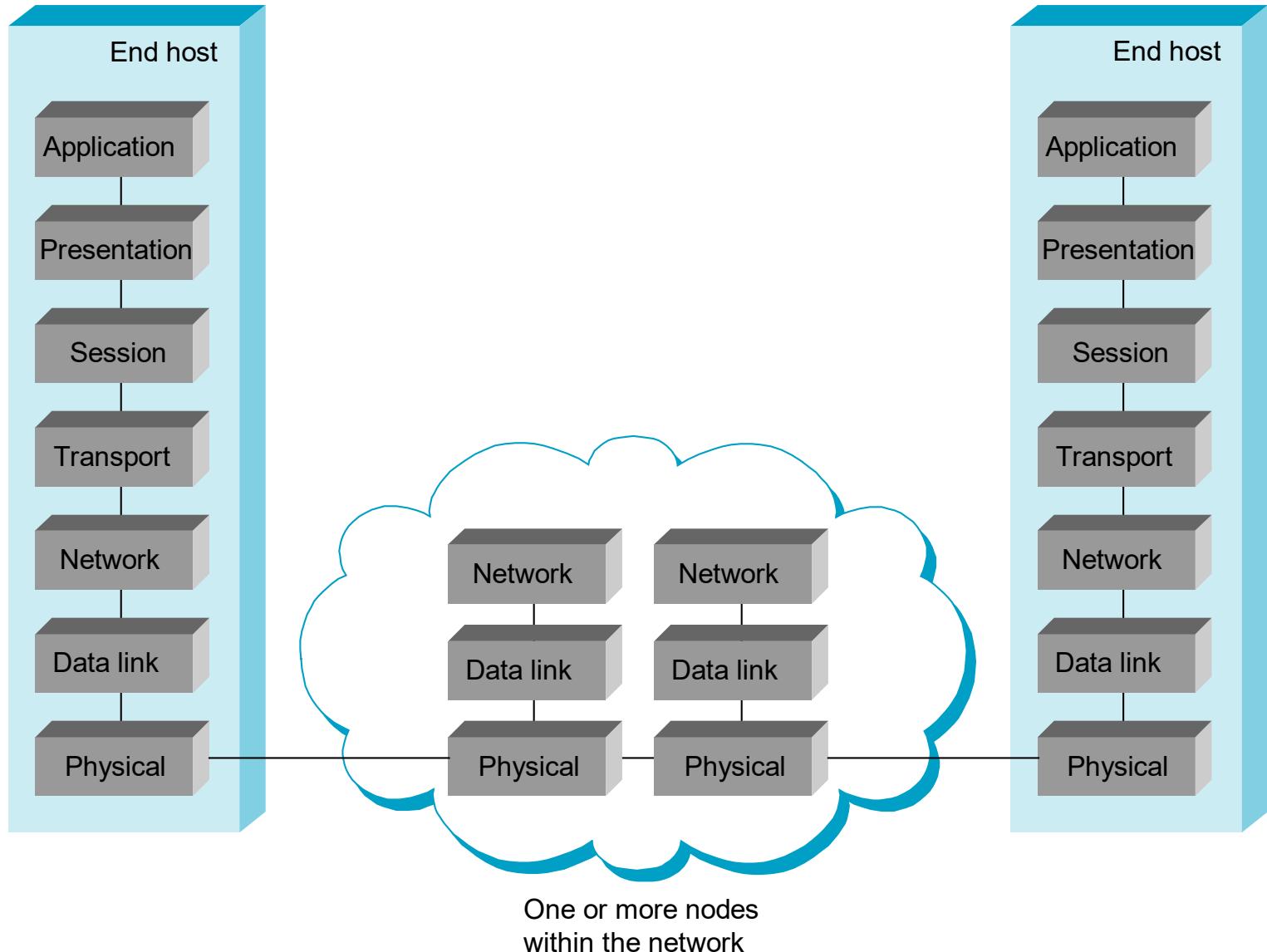
- The role of the architecture is to ensure
  - that the resulting technical design will be consistent and coherent;
  - that the pieces will fit together smoothly;
  - that the design will satisfy the requirements on network function associated with the architecture.

# What is an architecture?

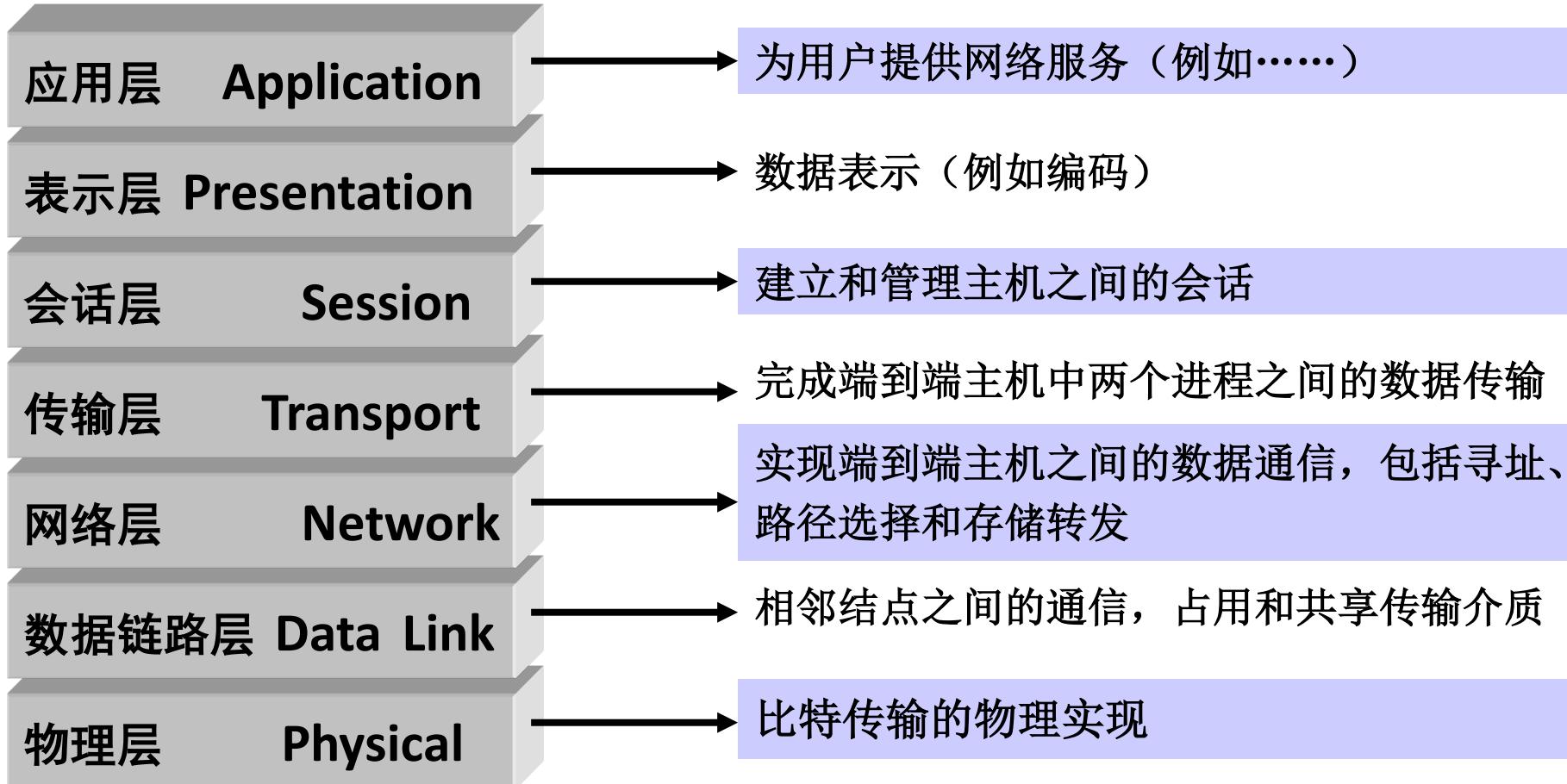
- ➊ The complexity of the communication task is reduced by using multiple protocol layers:
  - ☛ Each protocol is implemented independently;
  - ☛ Each protocol is responsible for a specific subtask;
  - ☛ Protocols are grouped in a hierarchy.
- ➋ A structured set of protocols is called a networks architecture or protocol suite, e.g. TCP/IP

# Computer Network Architectures

应用层  
表示层  
会话层  
运输层  
网络层  
数据链路层  
物理层

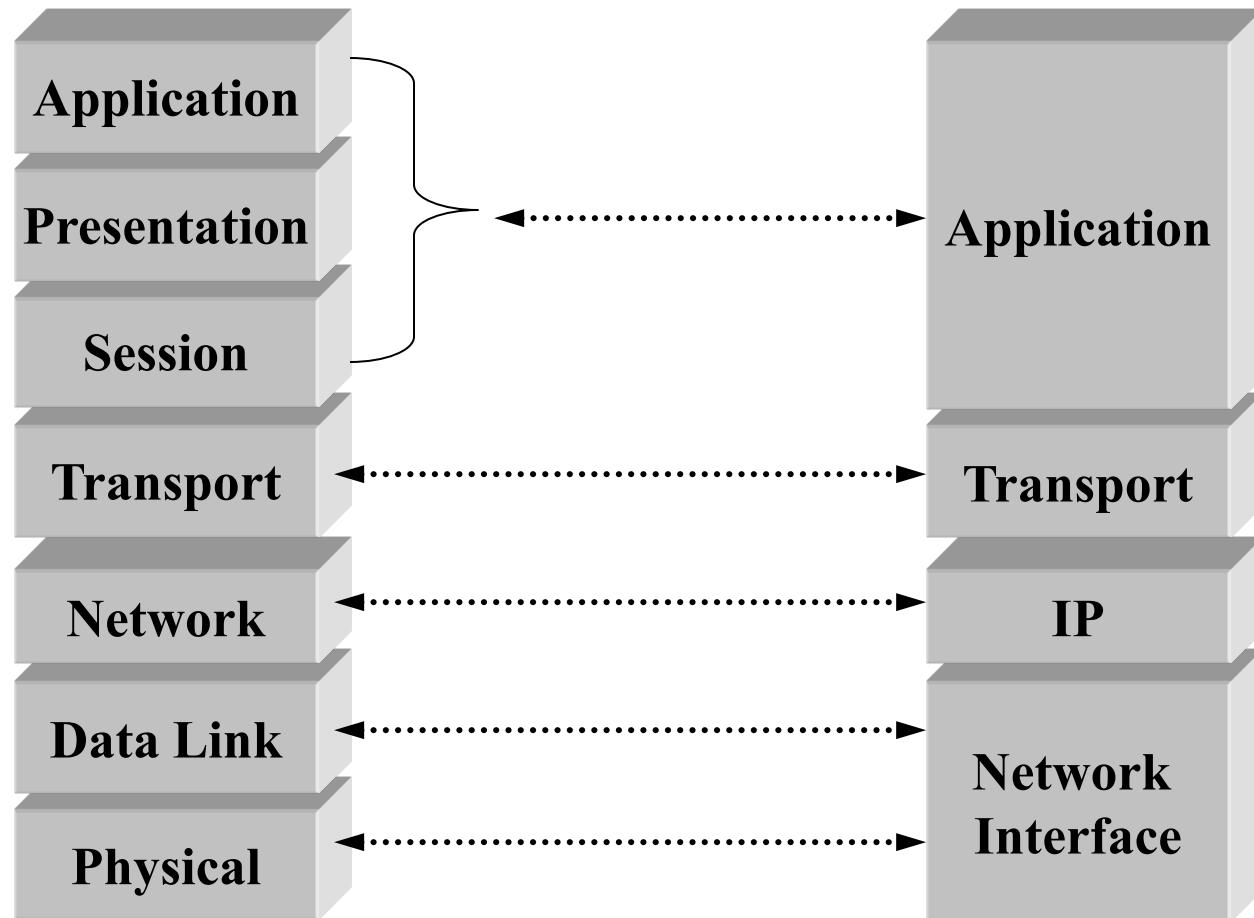


# The OSI Reference Model



# The TCP/IP Architecture

# Comparison: OSI and TCP/IP



# Internet工程任务组

- IETF (Internet Engineering Task Force) 成立于1985年底，是全球互联网最具权威的技术标准化组织。
- 主要任务是负责互联网相关技术规范的研发和制定。
- 当前绝大多数国际互联网技术标准出自IETF。

# TCP/IP Architecture

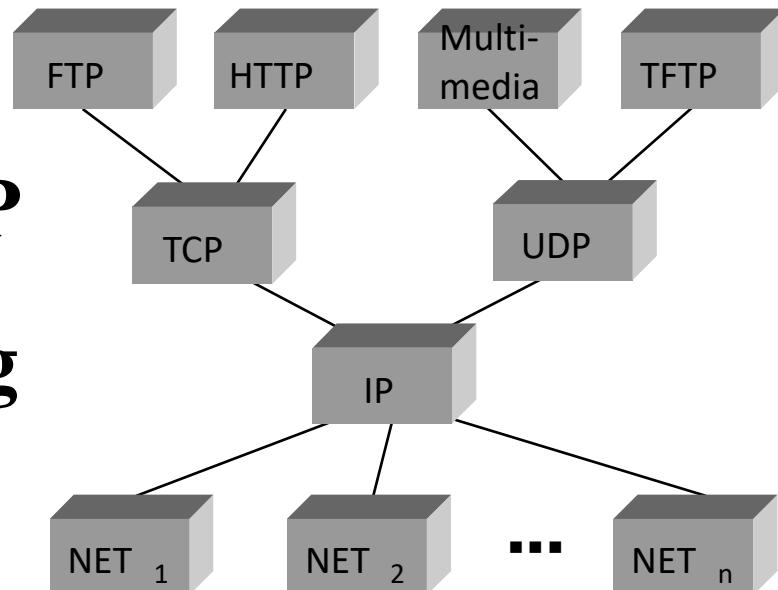
- The TCP/IP Architecture was defined by IETF

- Transparent Design

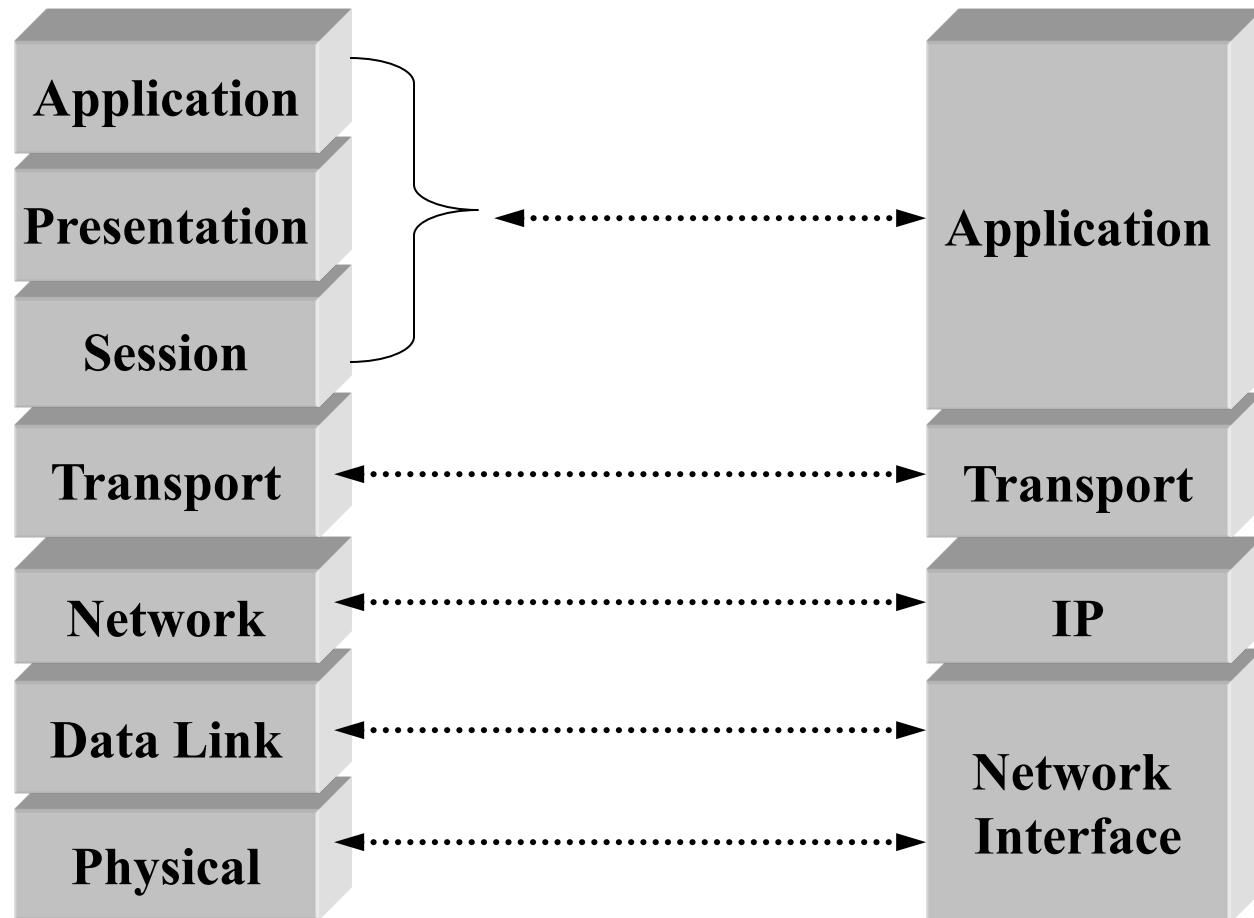
- ♠ Everything over IP

- ♠ IP over Everything

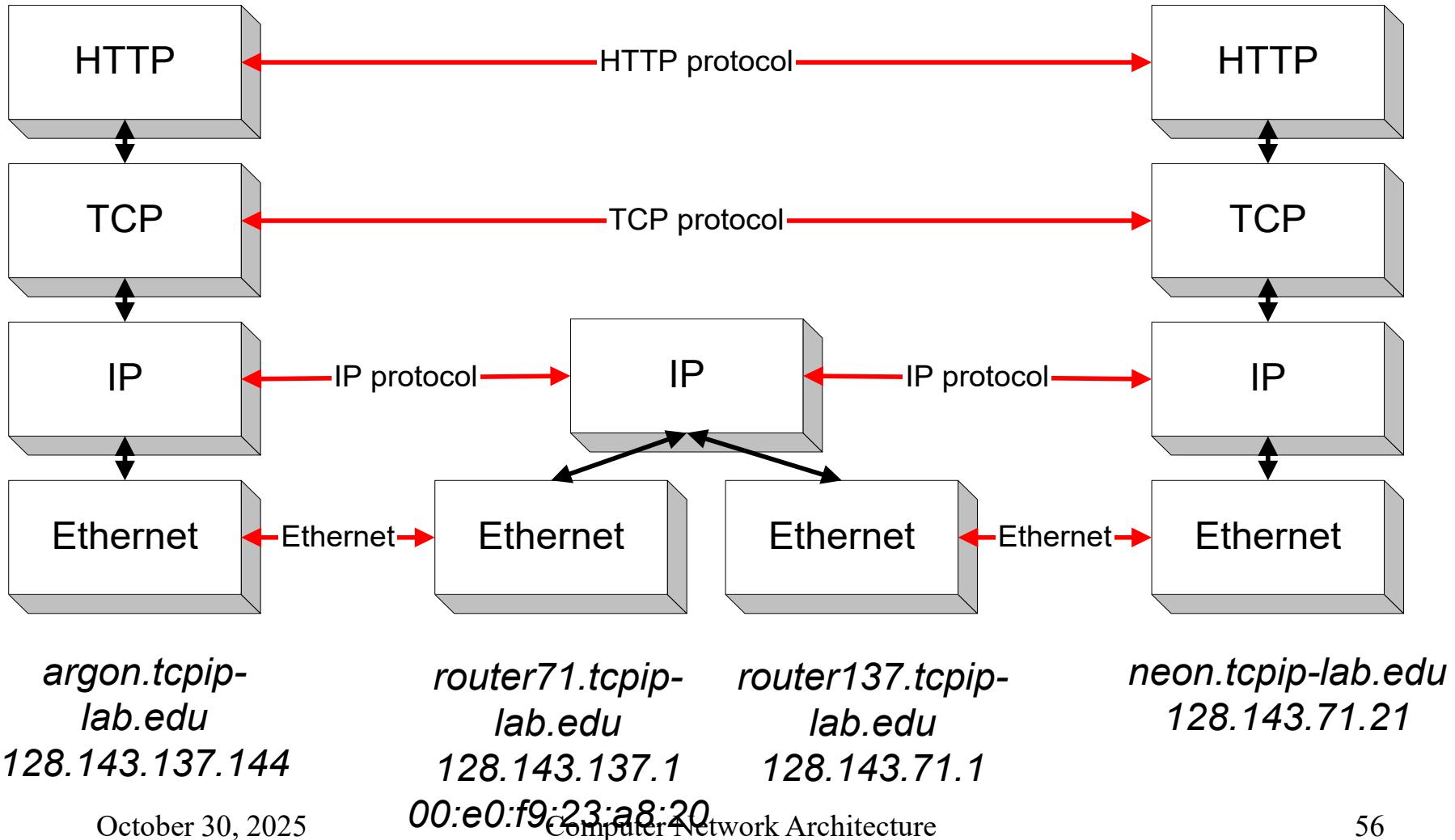
- ♠ Best-effort



# Comparison: OSI and TCP/IP



# Layers in the Example



128.143.137.144

October 30, 2025

router71.tcpip-  
lab.edu

128.143.137.1

00:e0:f9:23:a8:20

router137.tcpip-  
lab.edu

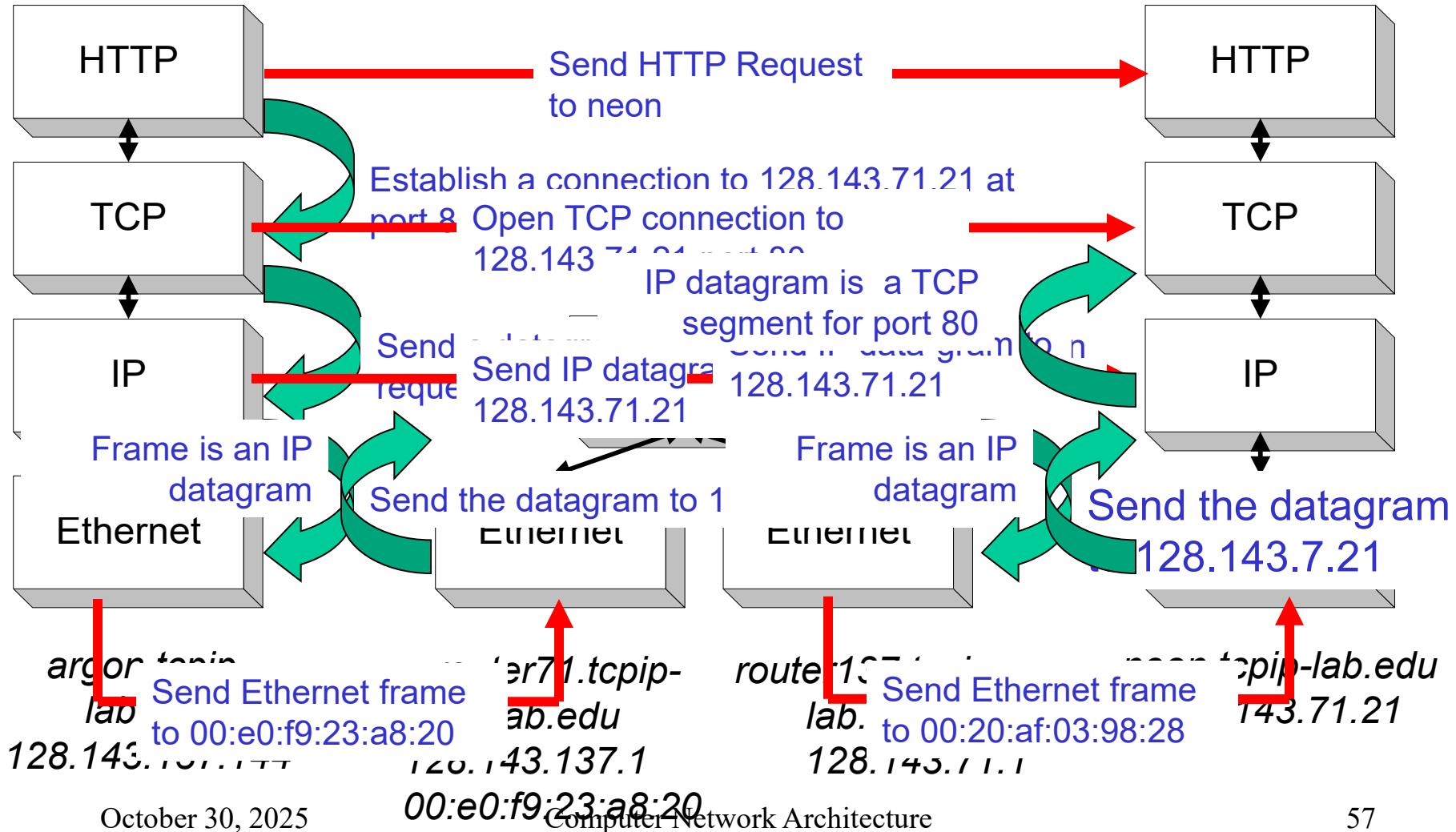
128.143.71.1

neon.tcpip-lab.edu  
128.143.71.21

56

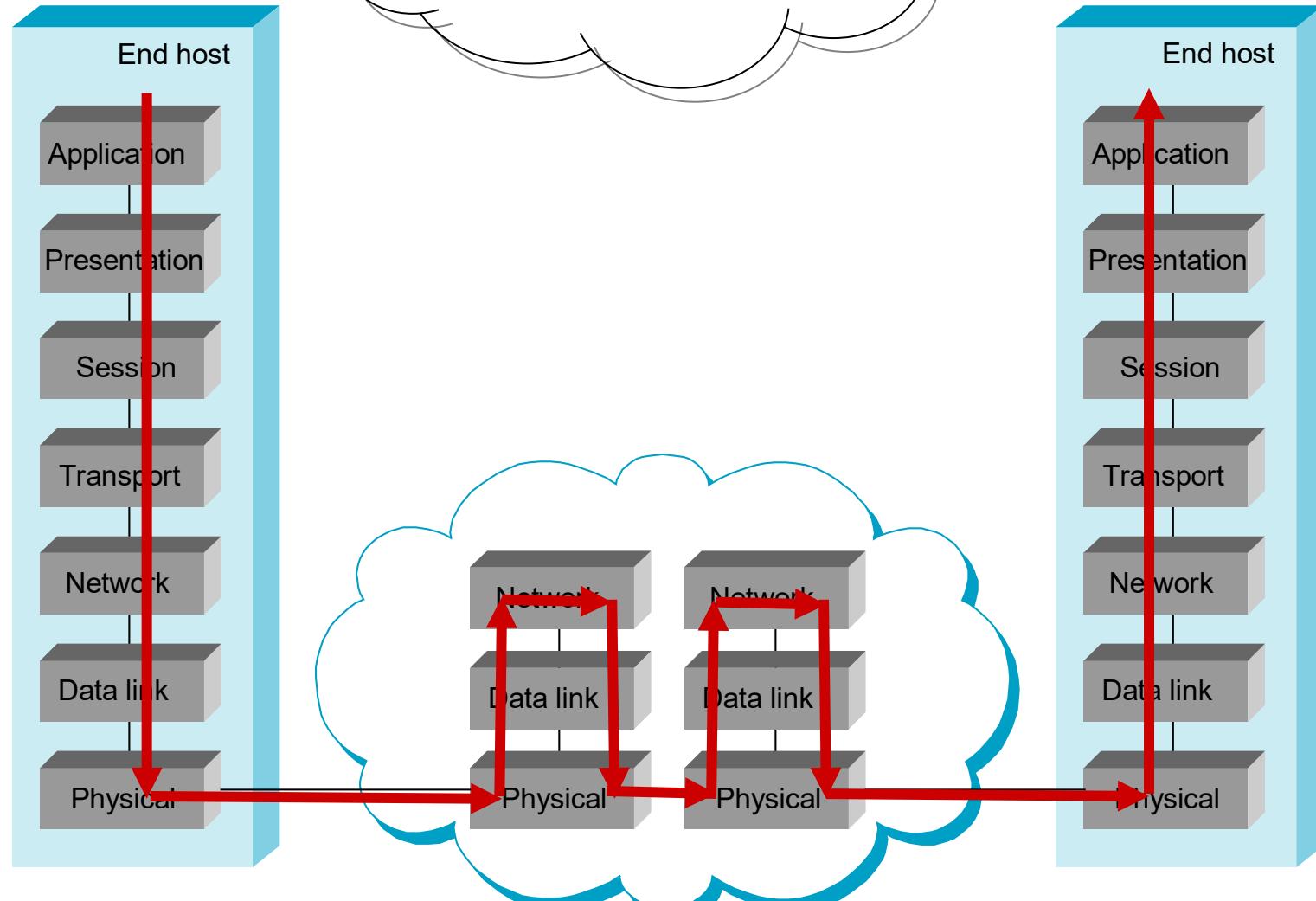
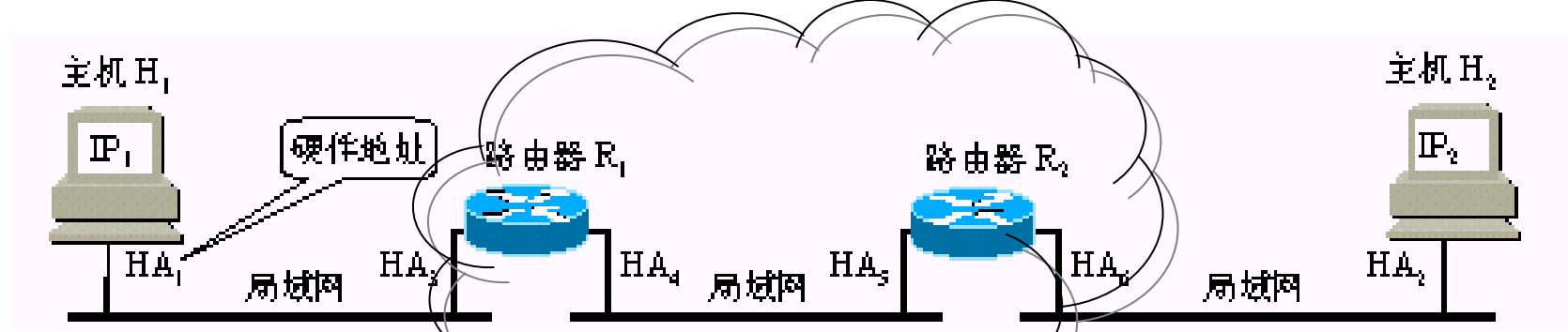
Computer Network Architecture

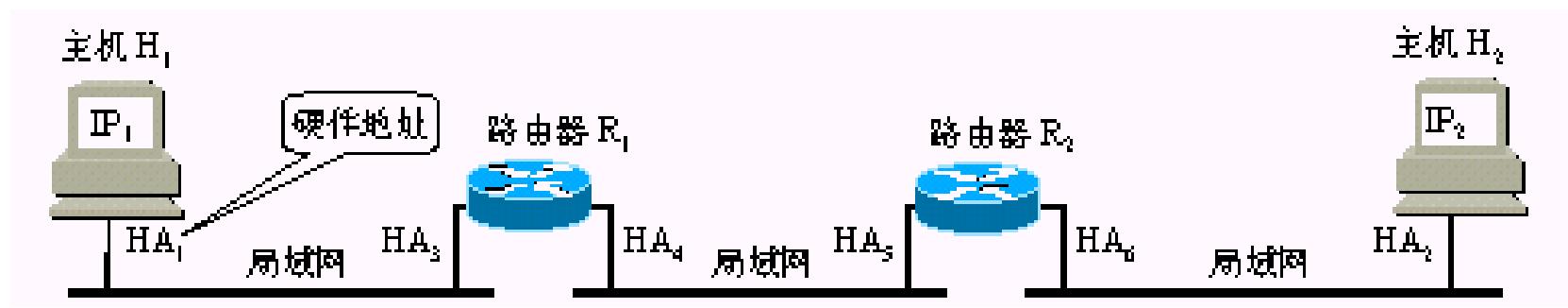
# Layers in the Example



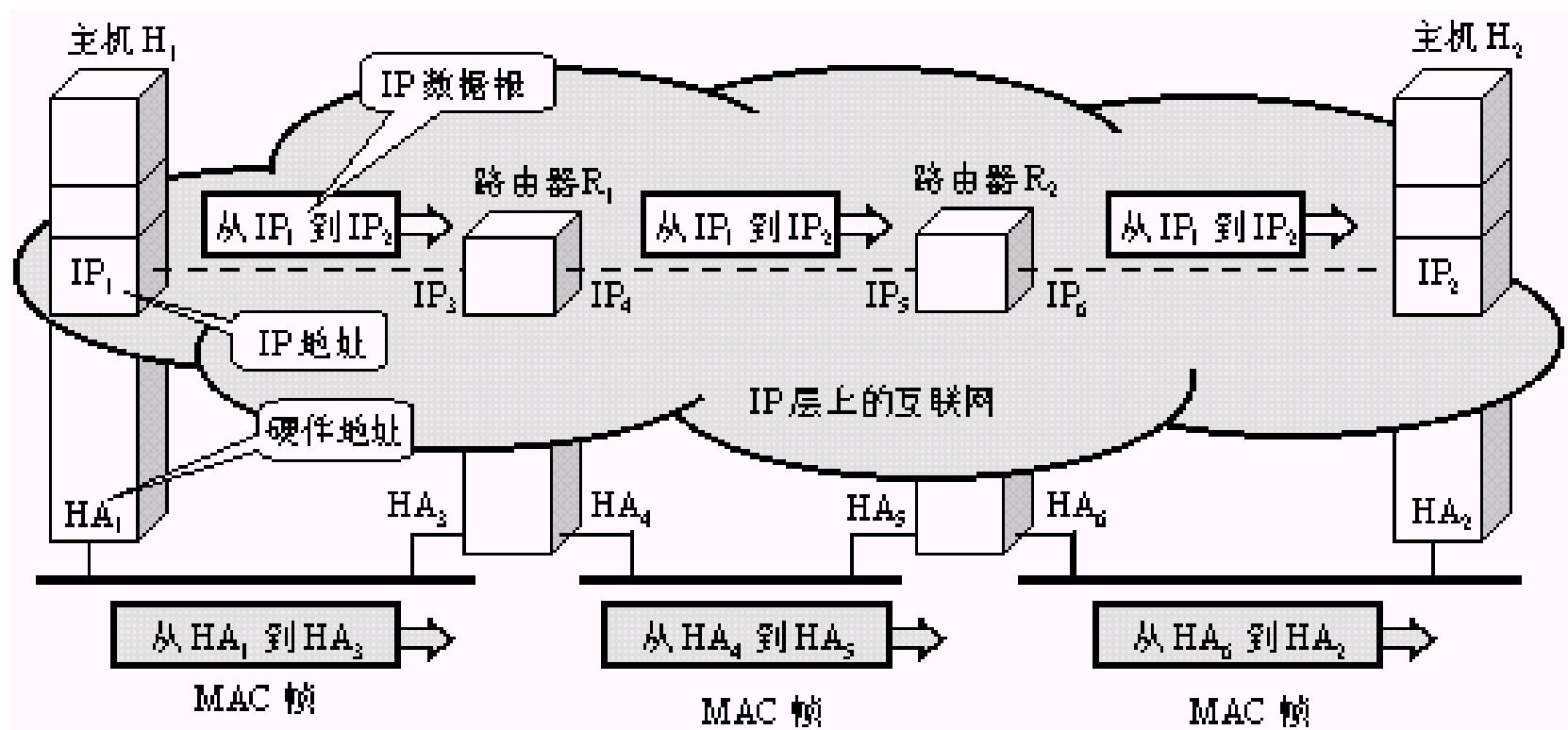
# Layers and Services

- **Service provided by TCP to HTTP:**
  - reliable transmission of data over a logical connection
- **Service provided by IP to TCP:**
  - unreliable transmission of IP datagrams across an IP network
- **Service provided by Ethernet to IP:**
  - transmission of a frame across an Ethernet segment



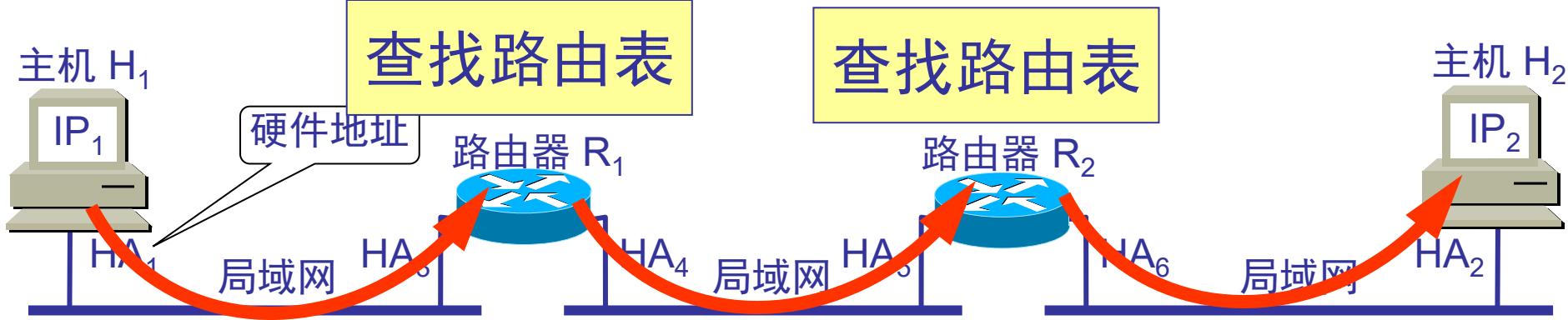


(a) 网络配置



(b) 不同层次、不同区间的源地址和目的地址

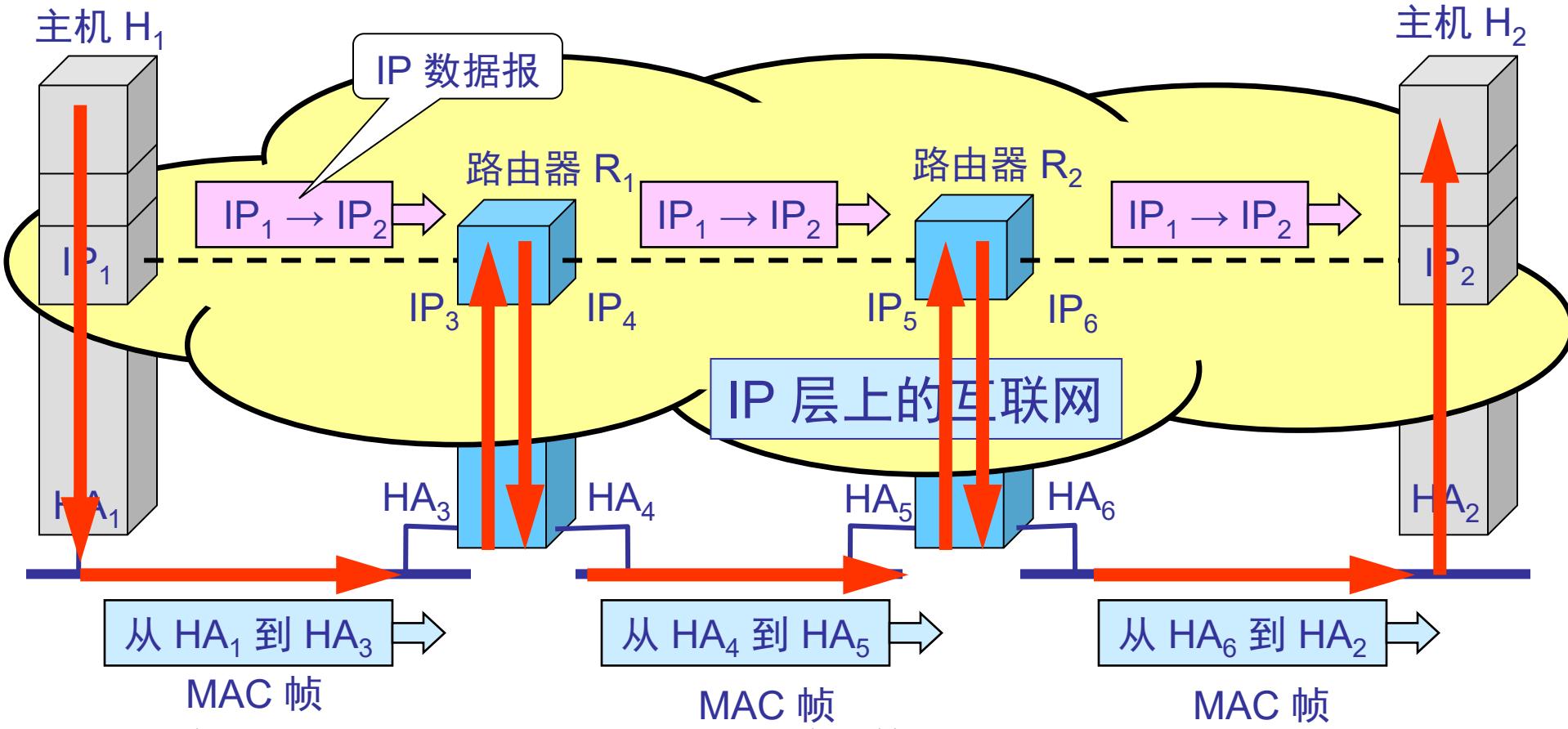
从不同层次上看 IP 地址和硬件地址



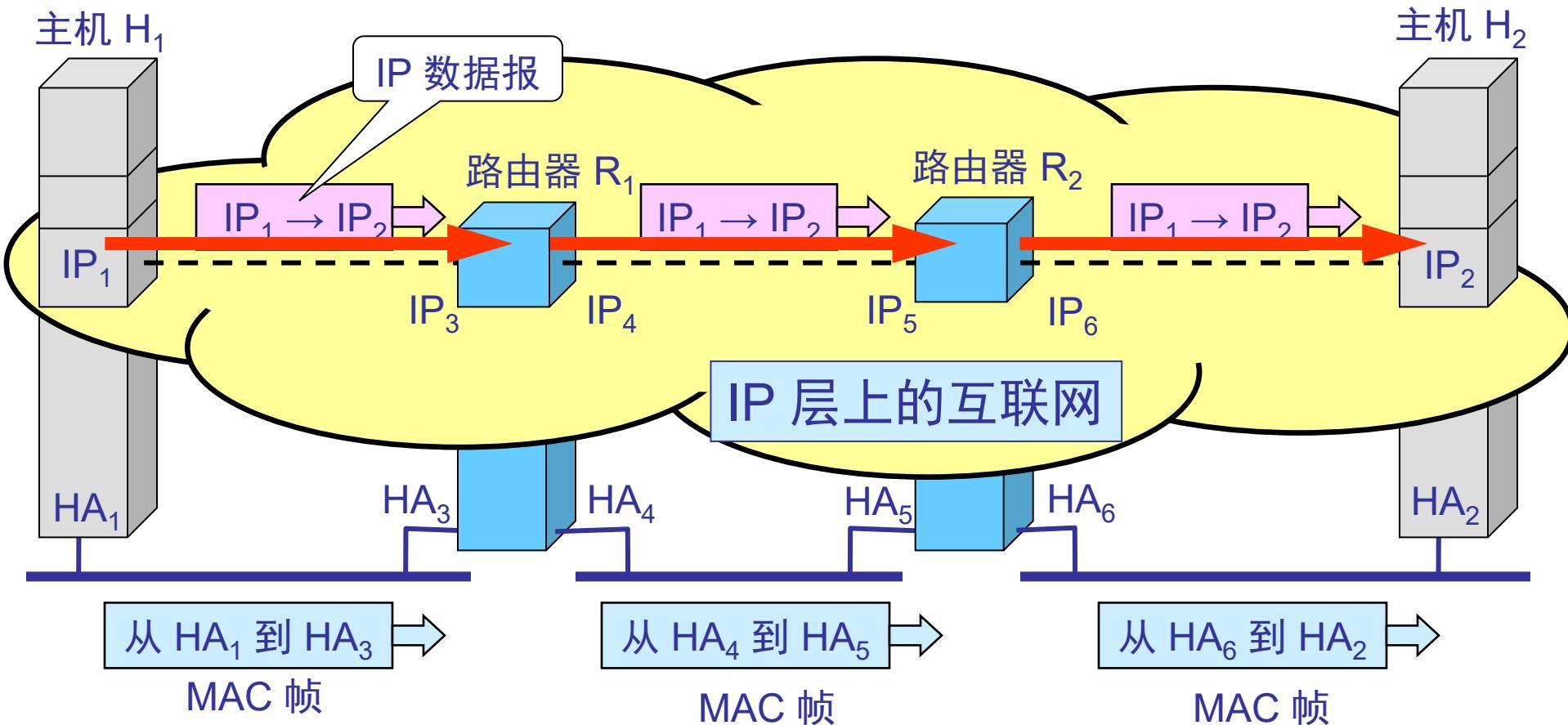
通信的路径

$H_1 \rightarrow$  经过  $R_1$  转发  $\rightarrow$  再经过  $R_2$  转发  $\rightarrow H_2$

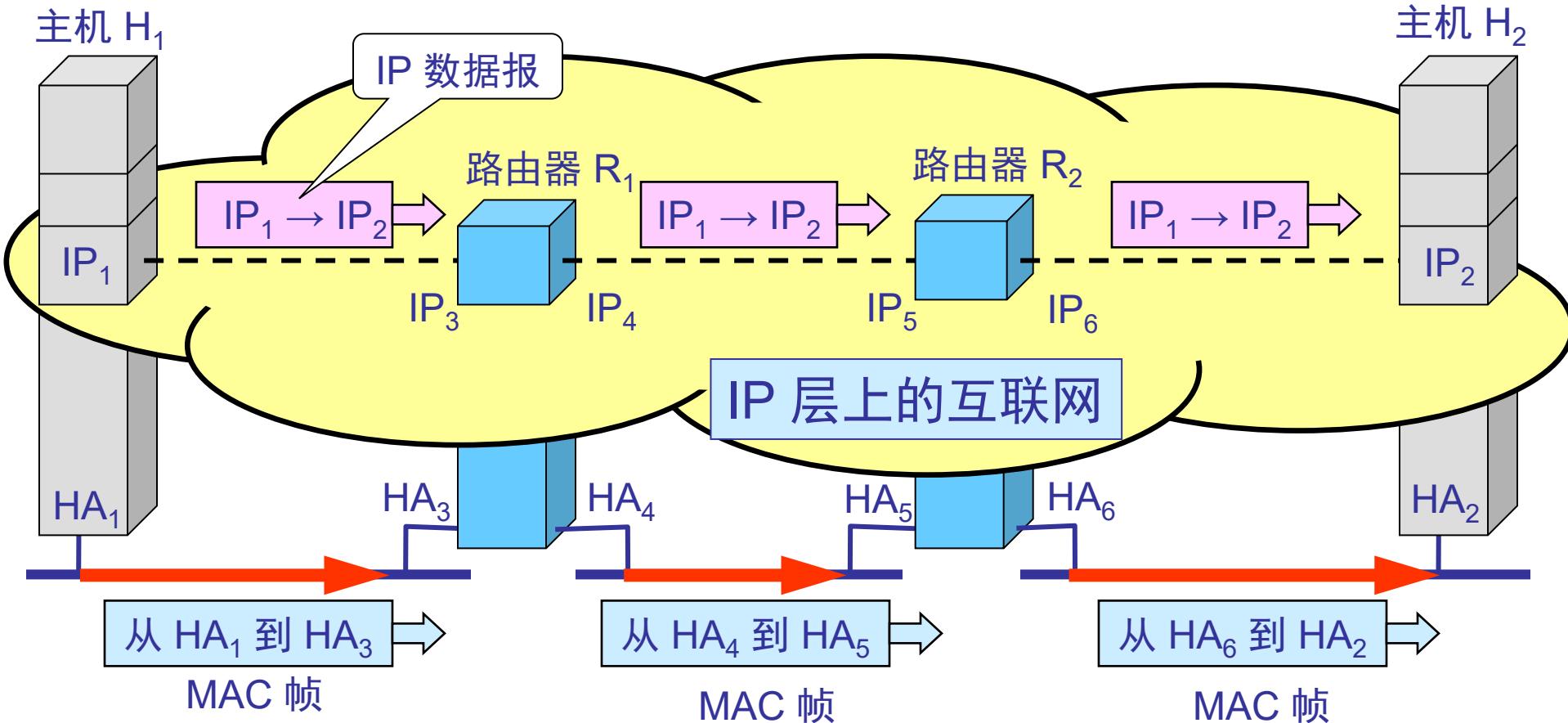
# 从协议栈的层次上看数据的流动



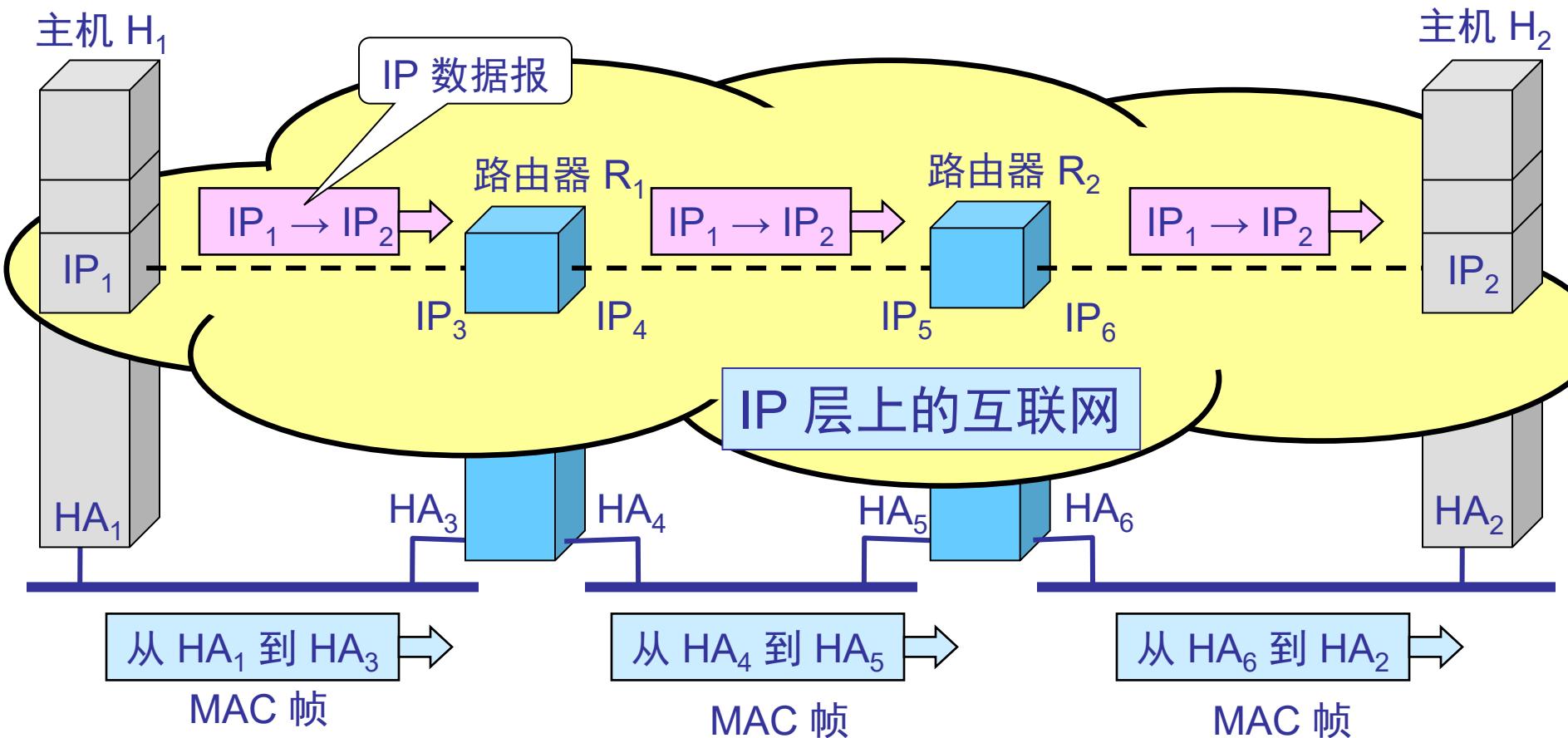
# 从虚拟的 IP 层上看 IP 数据报的流动



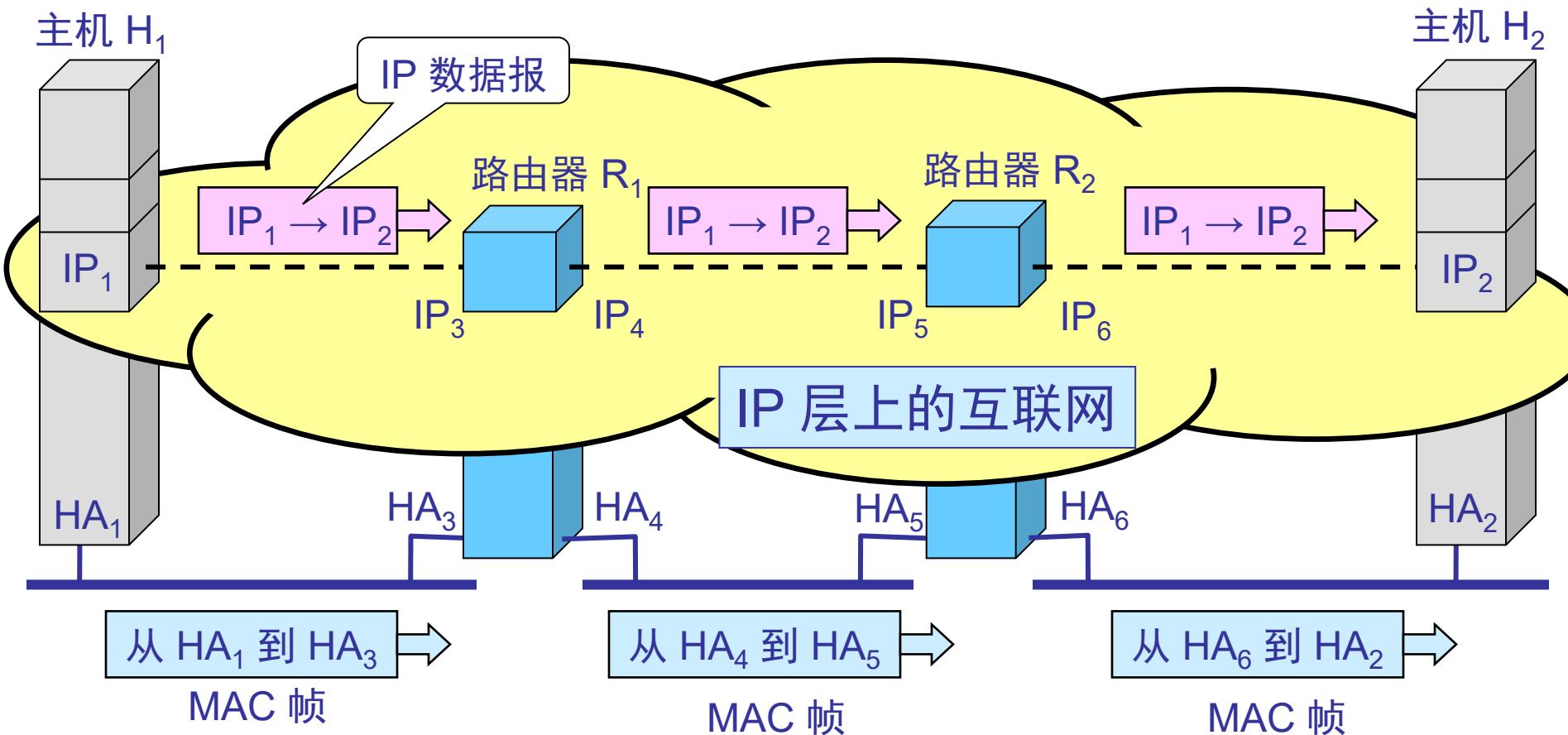
# 在链路上看 MAC 帧的流动



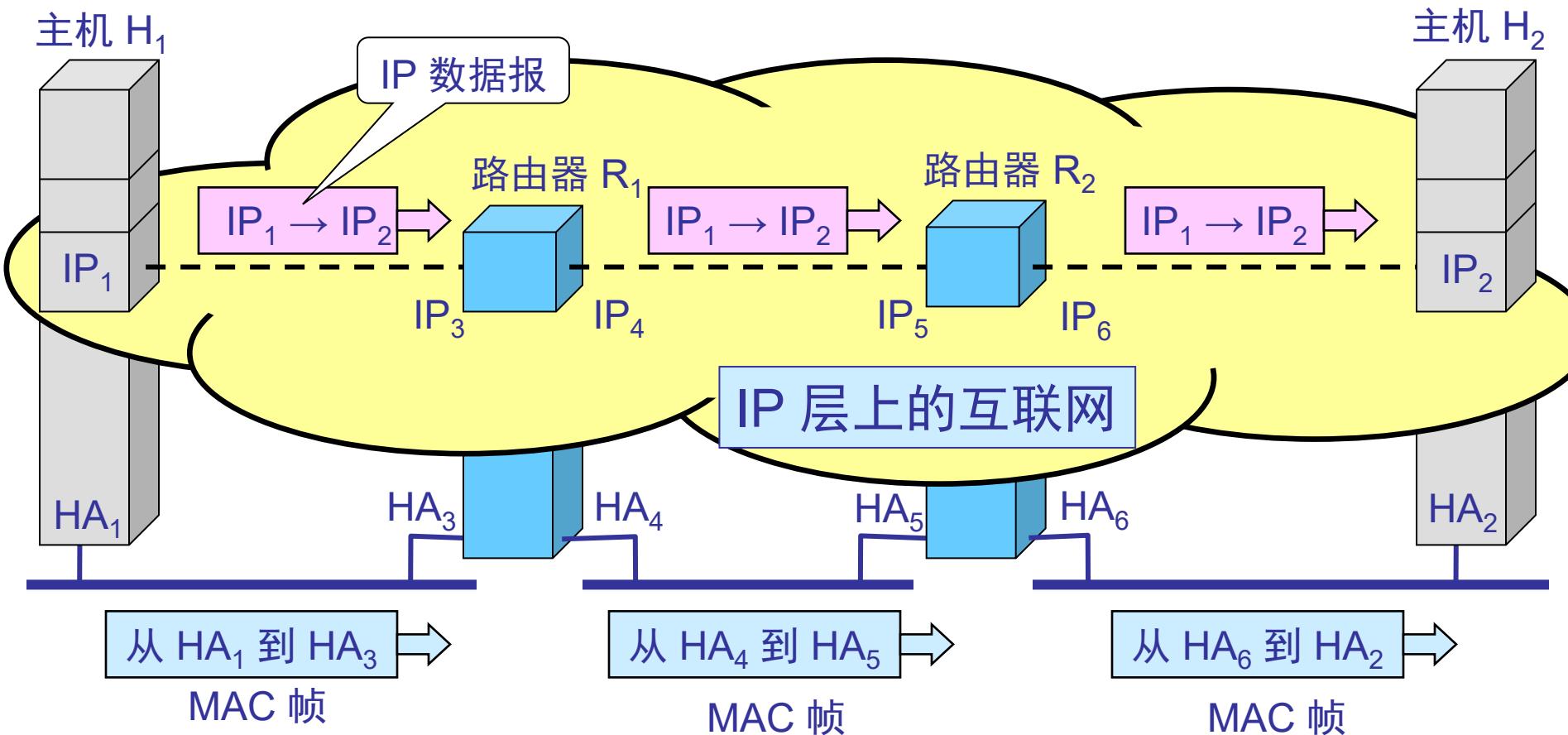
在 IP 层抽象的互联网上只能看到 IP 数据报  
图中的  $IP_1 \rightarrow IP_2$  表示从源地址  $IP_1$  到目的地址  $IP_2$   
两个路由器的 IP 地址并不出现在 IP 数据报的头部中



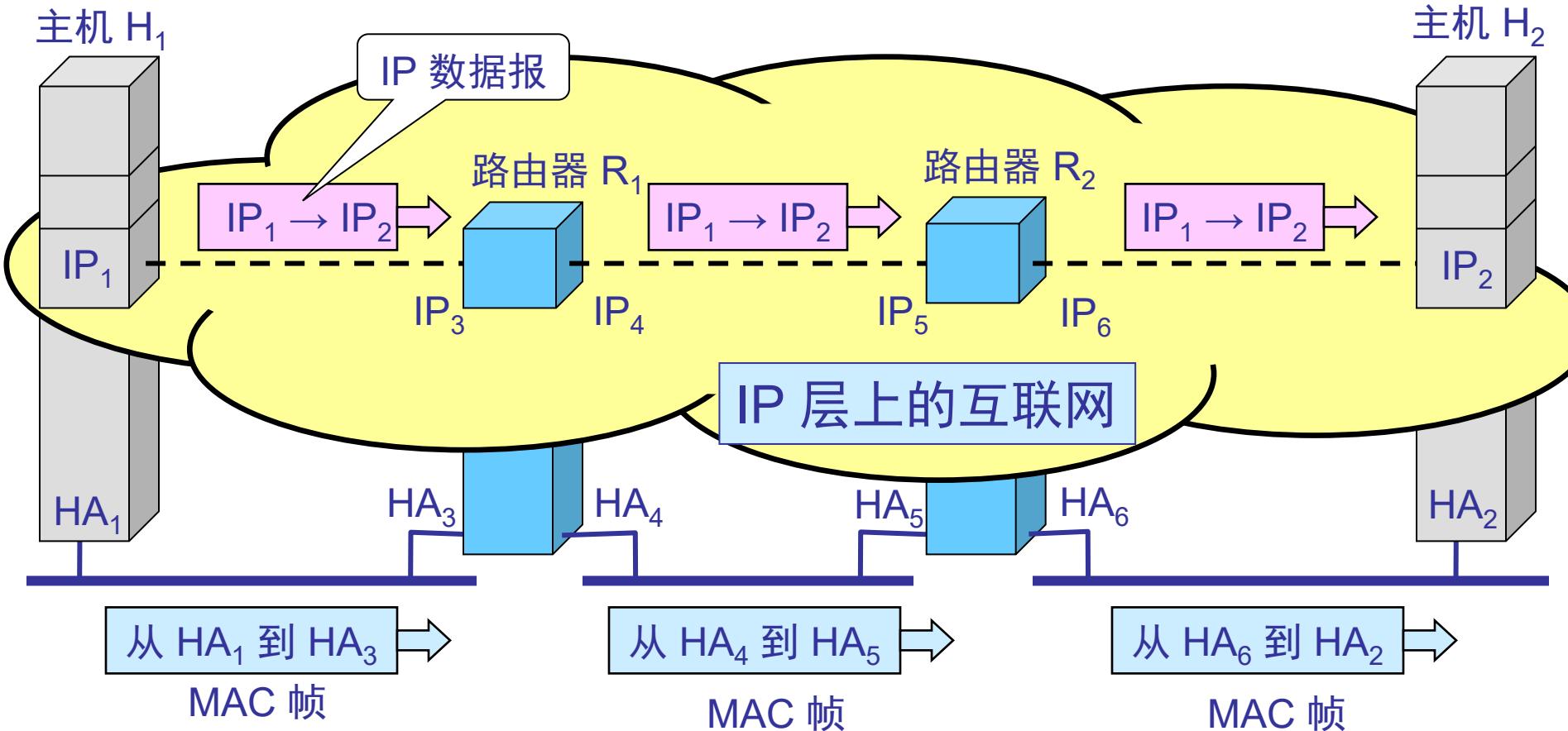
# 路由器只根据目的站的 IP 地址的网络号进行路由选择



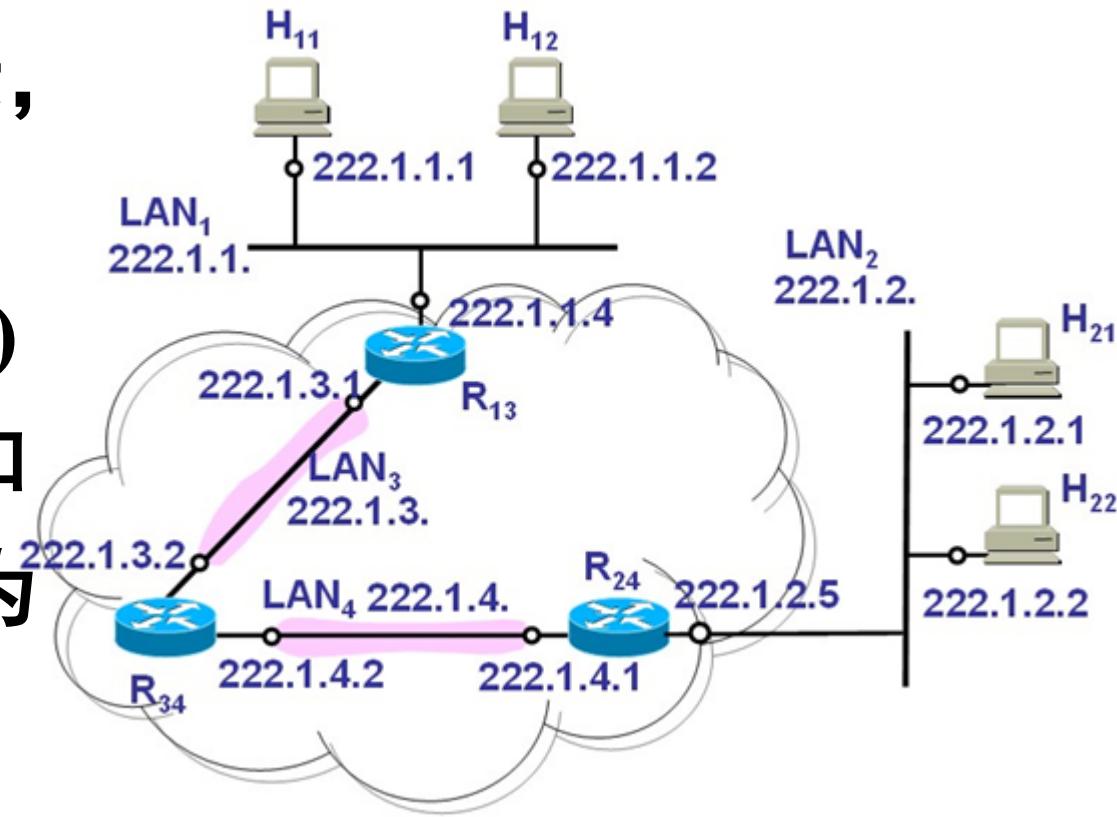
在具体的物理网络的链路层  
只能看见 MAC 帧而看不见 IP 数据报



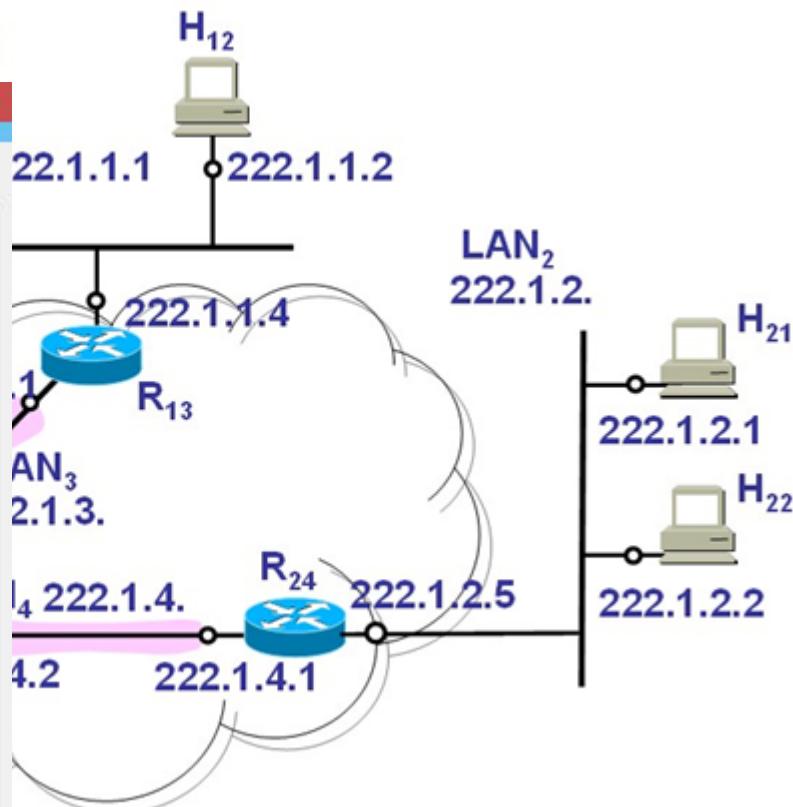
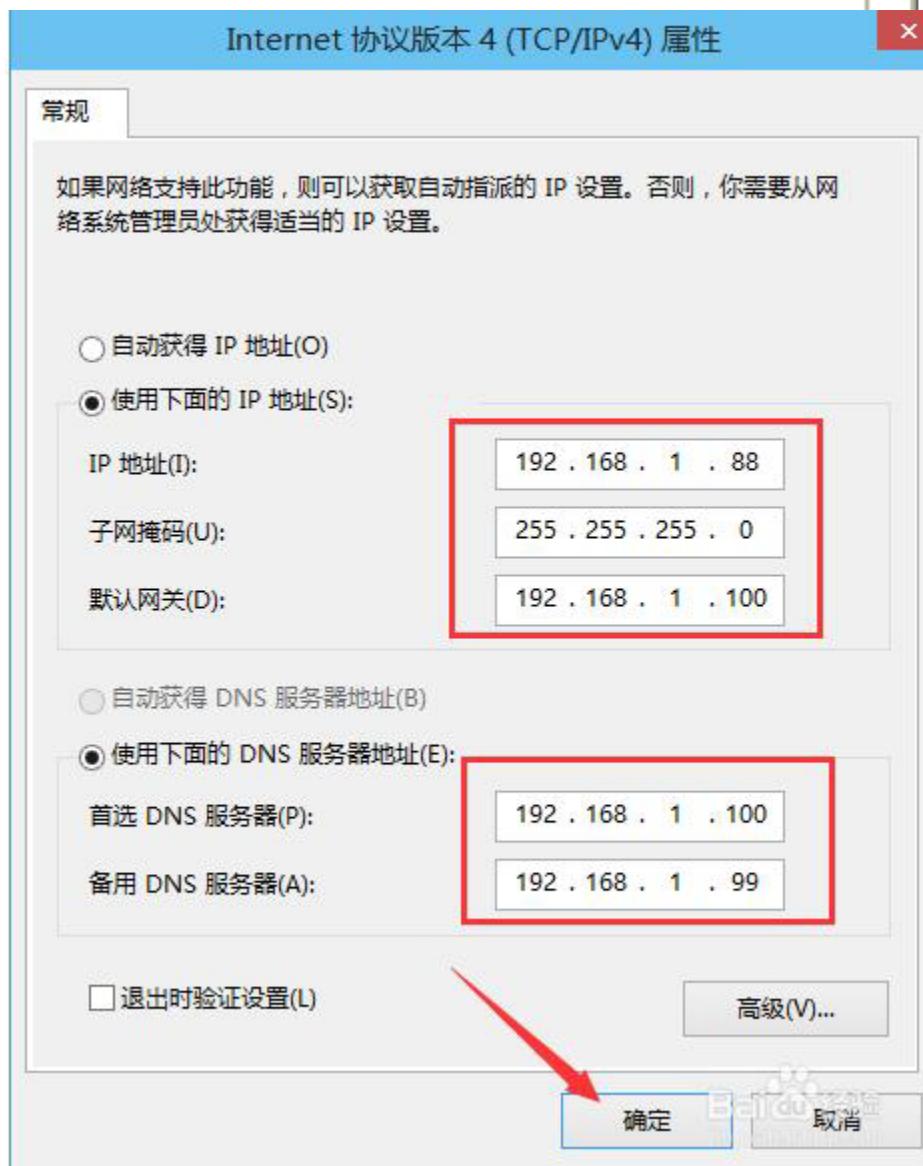
IP层抽象的互联网屏蔽了下层很复杂的细节  
在抽象的网络层上讨论问题，就能够使用  
统一的、抽象的 IP 地址  
研究主机和主机或主机和路由器之间的通信



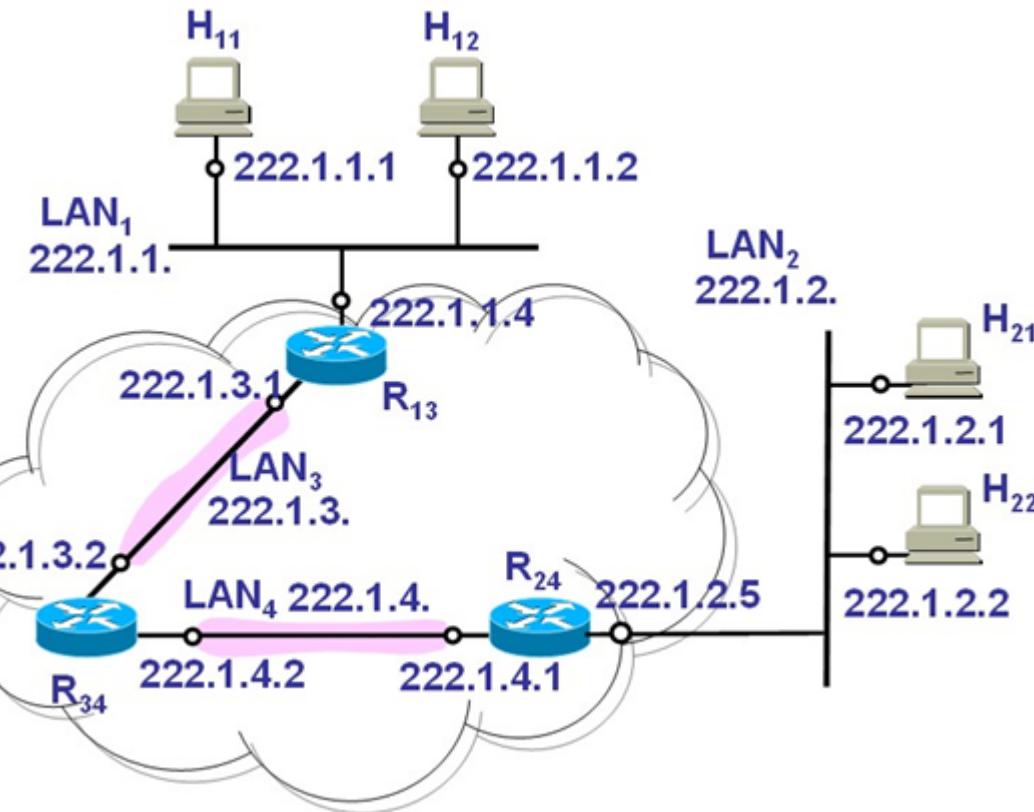
**课堂练习：**如图所示，  
四个局域网( $LAN_1$ ,  
 $LAN_2$ ,  $LAN_3$ 和 $LAN_4$ )  
通过路由器 $R_{13}$ ,  $R_{24}$ 和  
 $R_{34}$ 互联。子网掩码为  
255.255.255.0



(1)试问主机H<sub>21</sub>和H<sub>22</sub>的默认网关地址是多少？



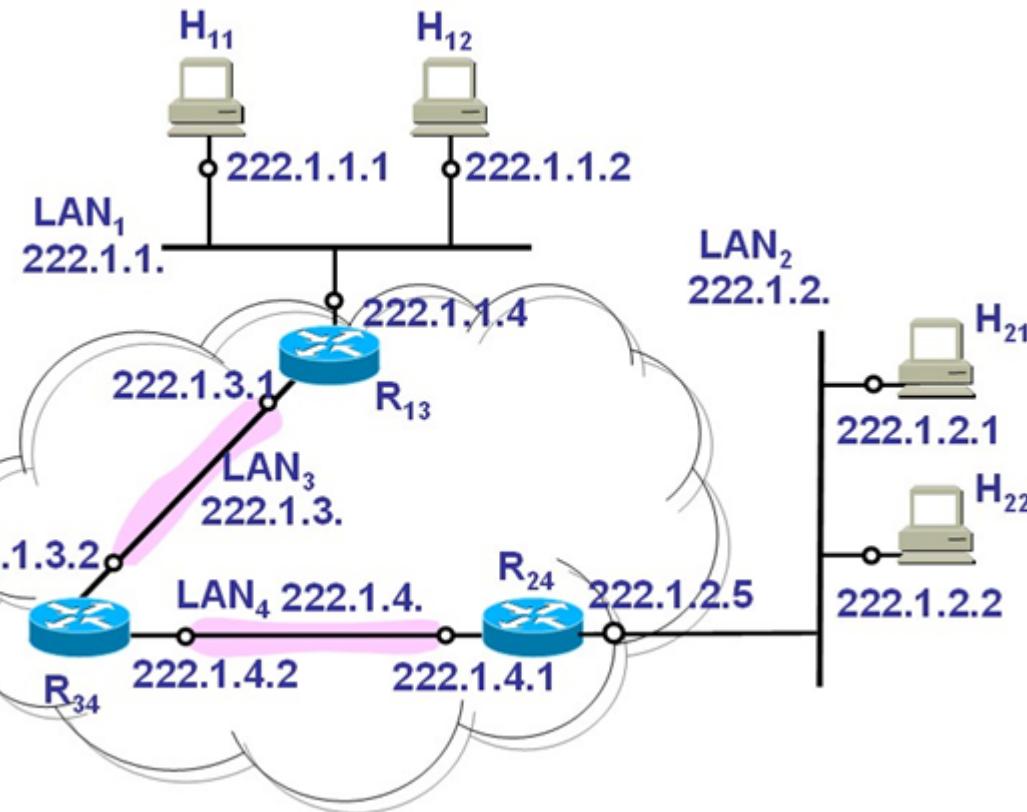
**课堂练习：**如图所示，  
四个局域网( $LAN_1$ ,  
 $LAN_2$ ,  $LAN_3$ 和 $LAN_4$ )  
通过路由器 $R_{13}$ ,  $R_{24}$ 和  
 $R_{34}$ 互联。子网掩码为  
255.255.255.0



(1)试问主机 $H_{21}$ 和 $H_{22}$ 的默认网关地址是多少？

答： 222.1.2.5

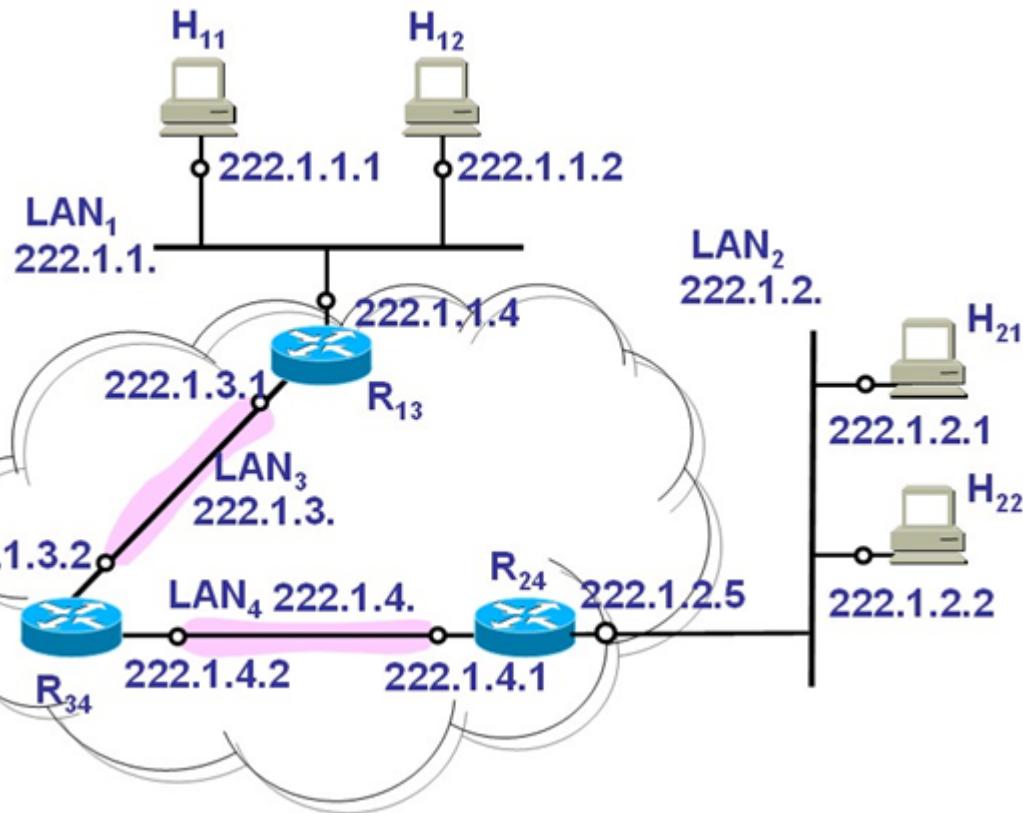
**课堂练习：**如图所示，  
四个局域网( $LAN_1$ ,  
 $LAN_2$ ,  $LAN_3$ 和 $LAN_4$ )  
通过路由器 $R_{13}$ ,  $R_{24}$ 和  
 $R_{34}$ 互联。子网掩码为  
255.255.255.0



(2)请完成路由器 $R_{34}$ 的路由表配置

目的网络	子网掩码	下一跳地址

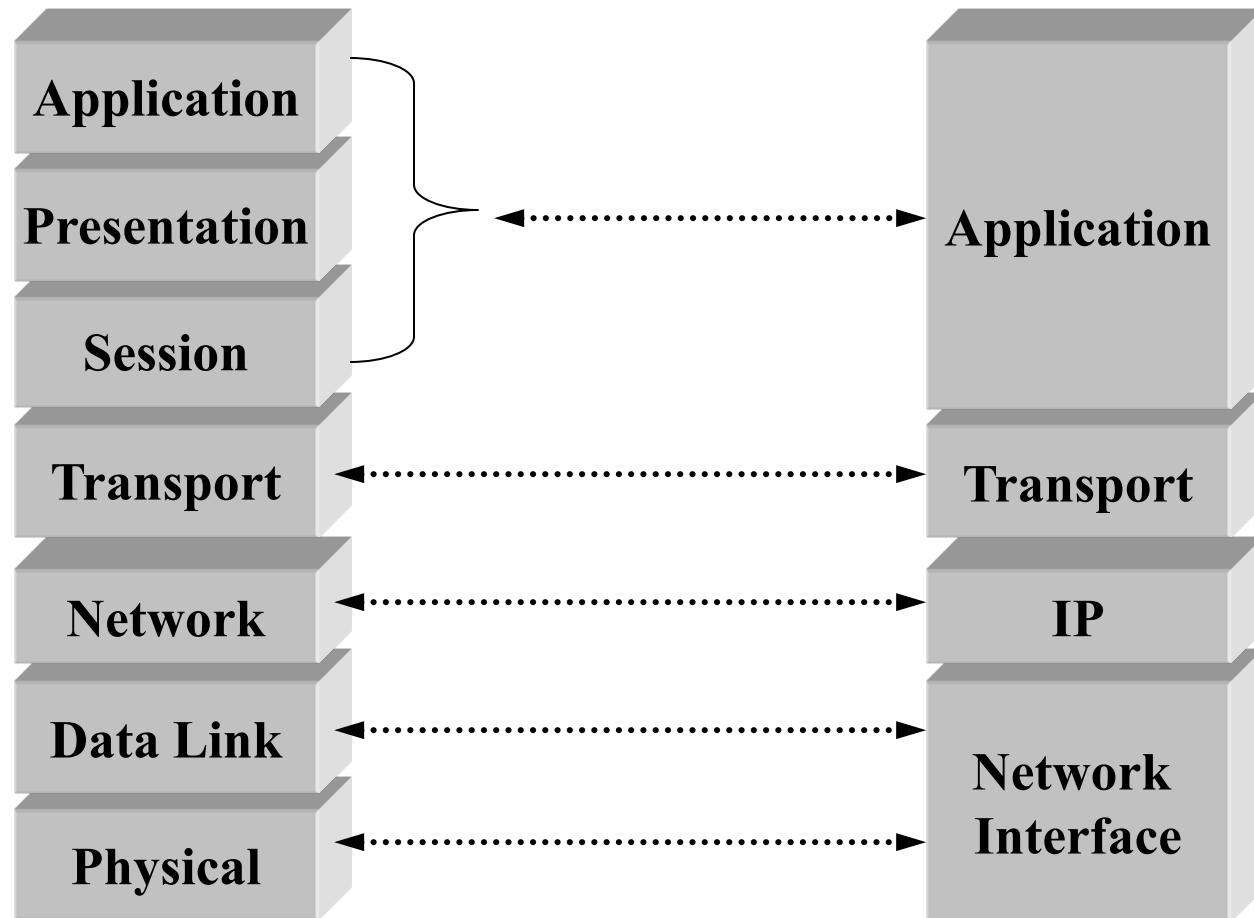
**课堂练习：**如图所示，  
四个局域网( $LAN_1$ ,  
 $LAN_2$ ,  $LAN_3$ 和 $LAN_4$ )  
通过路由器 $R_{13}$ ,  $R_{24}$ 和  
 $R_{34}$ 互联。子网掩码为  
255.255.255.0



(2)请完成路由器 $R_{34}$ 的路由表配置

目的网络	子网掩码	下一跳地址
222.1.1.0	255.255.255.0	222.1.3.1
222.1.2.0	255.255.255.0	222.1.4.1

# Comparison: OSI and TCP/IP



# OSI模型与TCP/IP模型比较

## ➤ 7层模型与4层模型

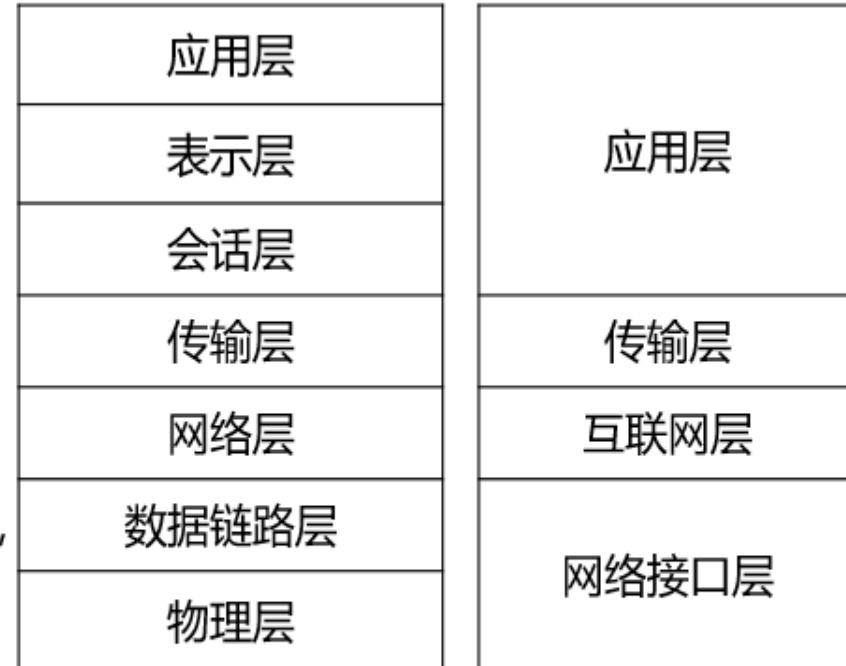
- TCP/IP模型的网络接口层定义主机与传输线路之间的接口，描述了链路为无连接的互联网层必须提供的基本功能
- TCP/IP模型的互联网层、传输层与OSI模型的网络层、传输层大致对应
- TCP/IP模型的应用层包含了OSI模型的表示层与会话层

## ➤ 基本设计思想：通用性与实用性

- OSI：先有模型后设计协议，不局限于特定协议，**明确了服务、协议、接口等概念**，更具通用性
- TCP/IP模型：仅仅是对已有协议的描述

## ➤ 无连接与面向连接

- OSI模型网络层能够支持无连接和面向连接通信
- TCP/IP模型的网络层仅支持无连接通信（IP）



OSI 7层模型

TCP/IP 4层模型

# OSI模型与TCP/IP模型比较

OSI的失败：糟糕的时机、技术、实现、政策

## OSI模型的不足

### ➤ 从未真正被实现

- TCP/IP已成为事实标准，OSI缺少厂家支持

### ➤ 技术实现糟糕

- OSI分层欠缺技术考虑：会话层、表示层很少内容；数据链路层、网络层内容繁杂。模型和协议过于复杂
- 分层间功能重复：差错控制、流量控制等在不同层反复出现

### ➤ 非技术因素

- TCP/IP实现为UNIX一部分，免费
- OSI被认为是政府和机构的强加标准

## TCP/IP模型的不足

### ➤ 核心概念未能体现

- 未明确区分服务、接口和协议等核心概念

### ➤ 不具备通用性

- 不适于描述TCP/IP之外的其它协议栈

### ➤ 混用接口与分层的设计

- 链路层和物理层一起被定义为网络接口层，而非真正意义上的分层

### ➤ 模型欠缺完整性

- 未包含物理层与数据链路层
- 物理层与数据链路层是至关重要的部分