

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

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

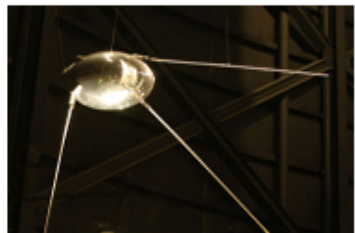
- **ACM SIGCOMM**
- **ACM MOBICOM**
- **IEEE INFOCOM**
- **IEEE GLOBECOM**
- **IEEE/ACM MASCOTS**

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：ARPANET（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



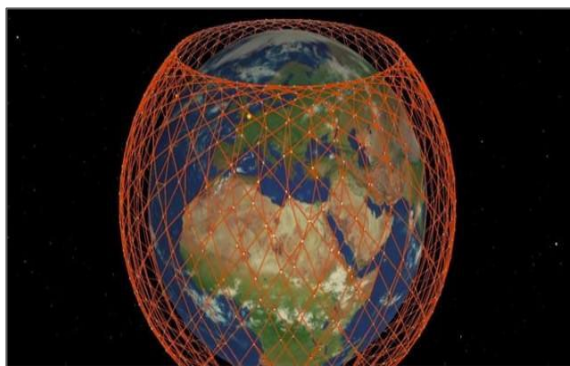
无人码头的远程操控



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



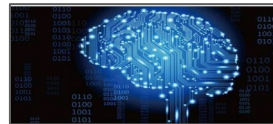
智慧城市



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

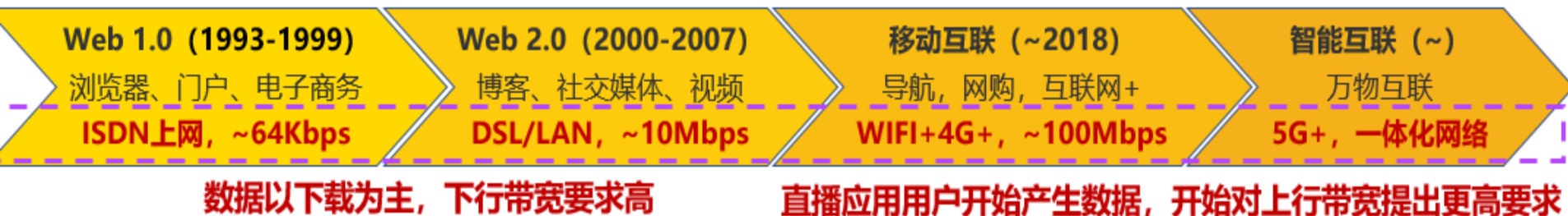
- 1、1969年ARPANET诞生
- 2、1983年ARPANET采用TCP/IP



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

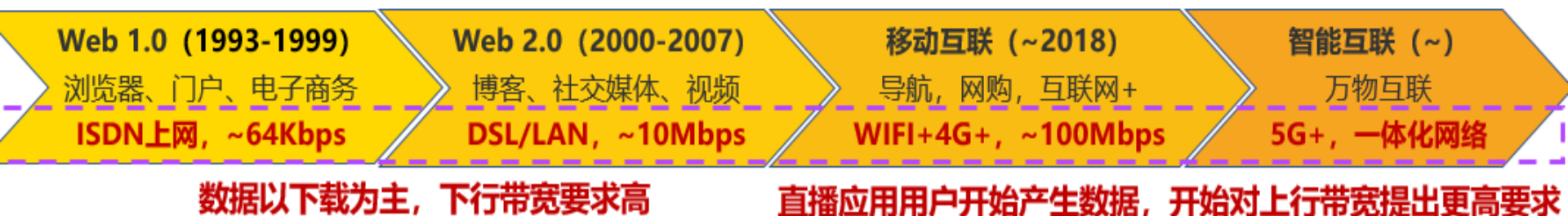
- 1993年Mosaic浏览器诞生, 开启了互联网广泛商用之路
- 94年万维网联盟W3C成立
- 互联网进入高速发展期: 雅虎、AOL、谷歌、亚马逊、EBay、Netflix、腾讯, 阿里, 百度, 京东
- 95年NSFnet退役, 转商业, 网景上市, 达29亿美元
- Netscape/微软IE世纪之争
- 2000年, 互联网泡沫破灭, 进入低调发展阶段
- Myspace、Skype、Safari, Facebook, Twitter, youtube, 土豆, youku
- 2007年, 3G+iPhone, 谷歌收购安卓, 即将进入移动互联
- 各种应用: Uber, airbnb, 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  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、伯克希尔哈撒韦、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

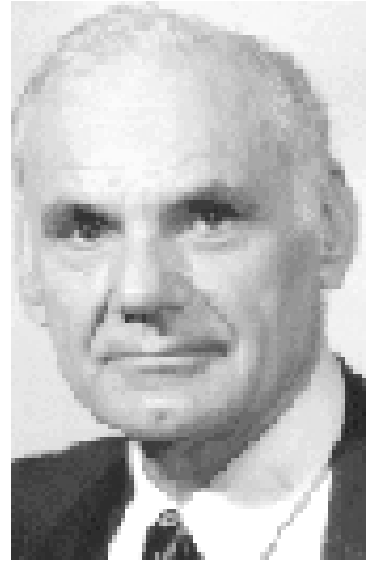
1969: ARPANET, the first packet-switched network 分组交换网 developed by Defense Advanced Research Projects Agency, USA

60~70年代：基本理论的形成

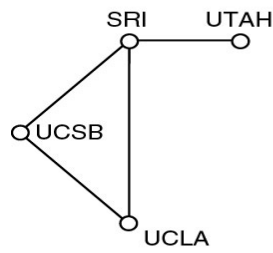
Lawrence G. Roberts—

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

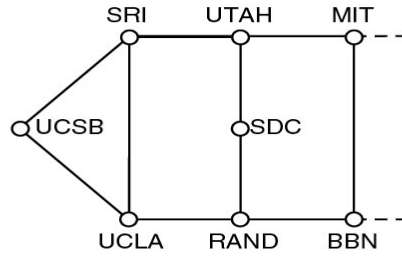
He was responsible for the design, initiation, planning and development of ARPANET, the world's first major packet network, the predecessor to Internet,



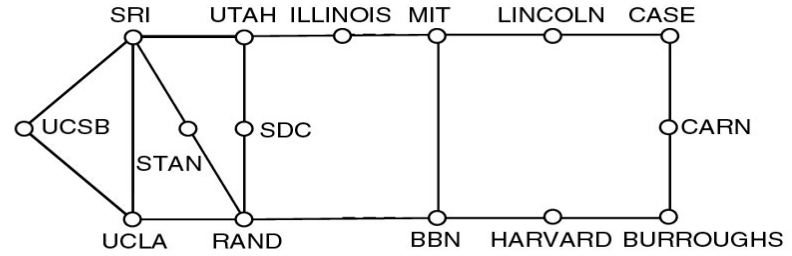
The ARPANET



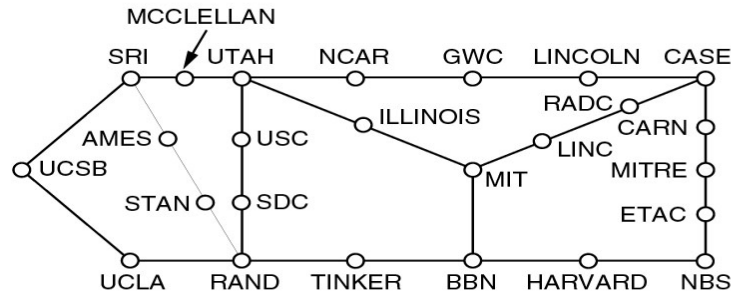
(a)



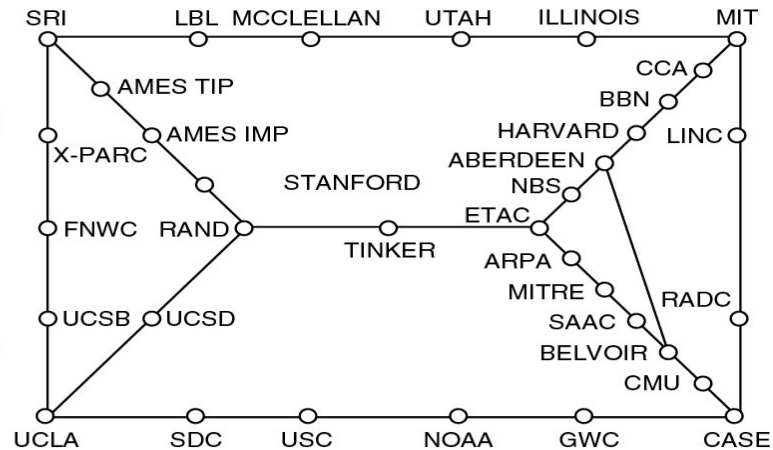
(b)



(c)



(d)



(e)

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

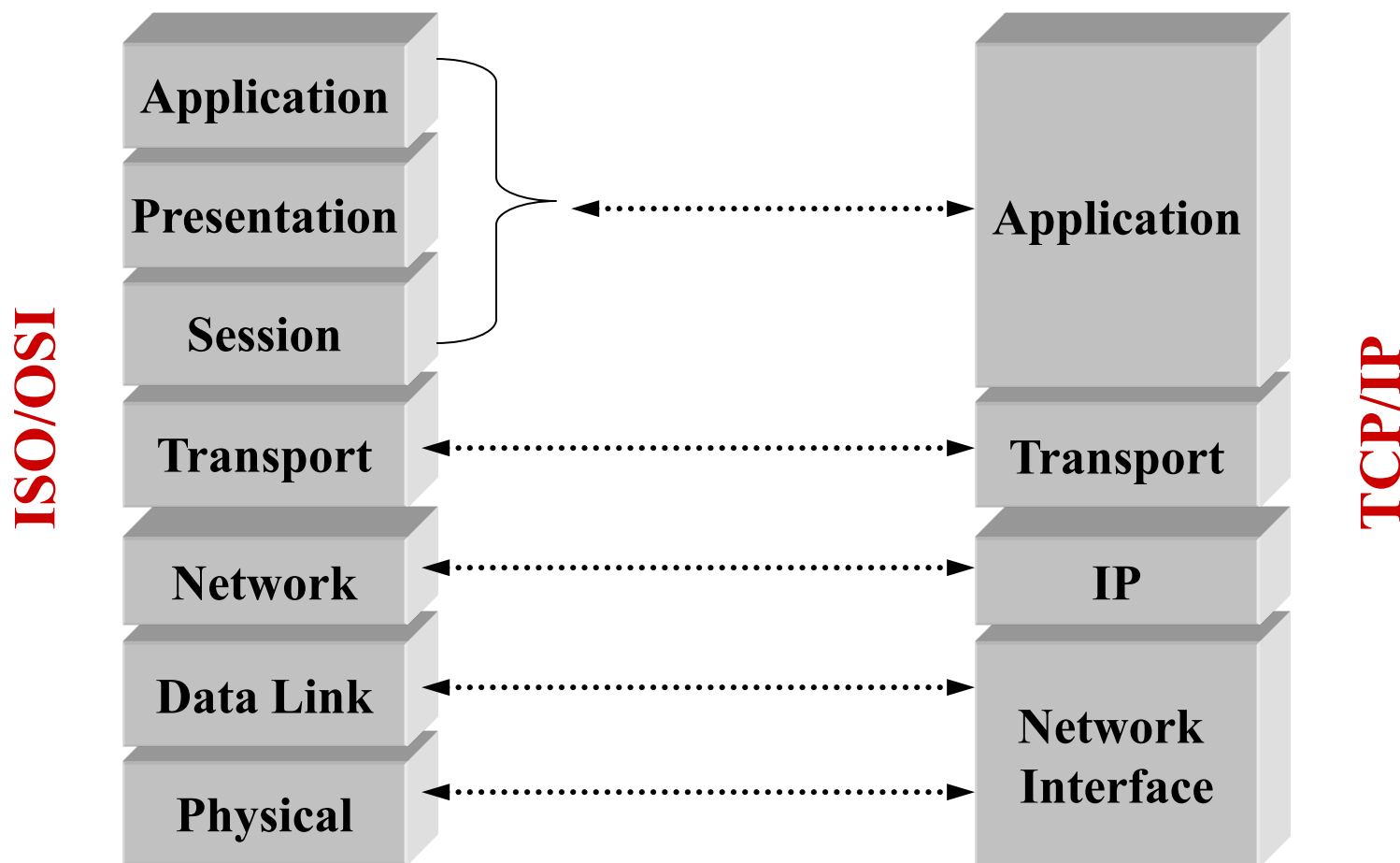
- ✍ 自身的分布式特性

- 原型系统： ARPANET, INTERNET

网络系统分层

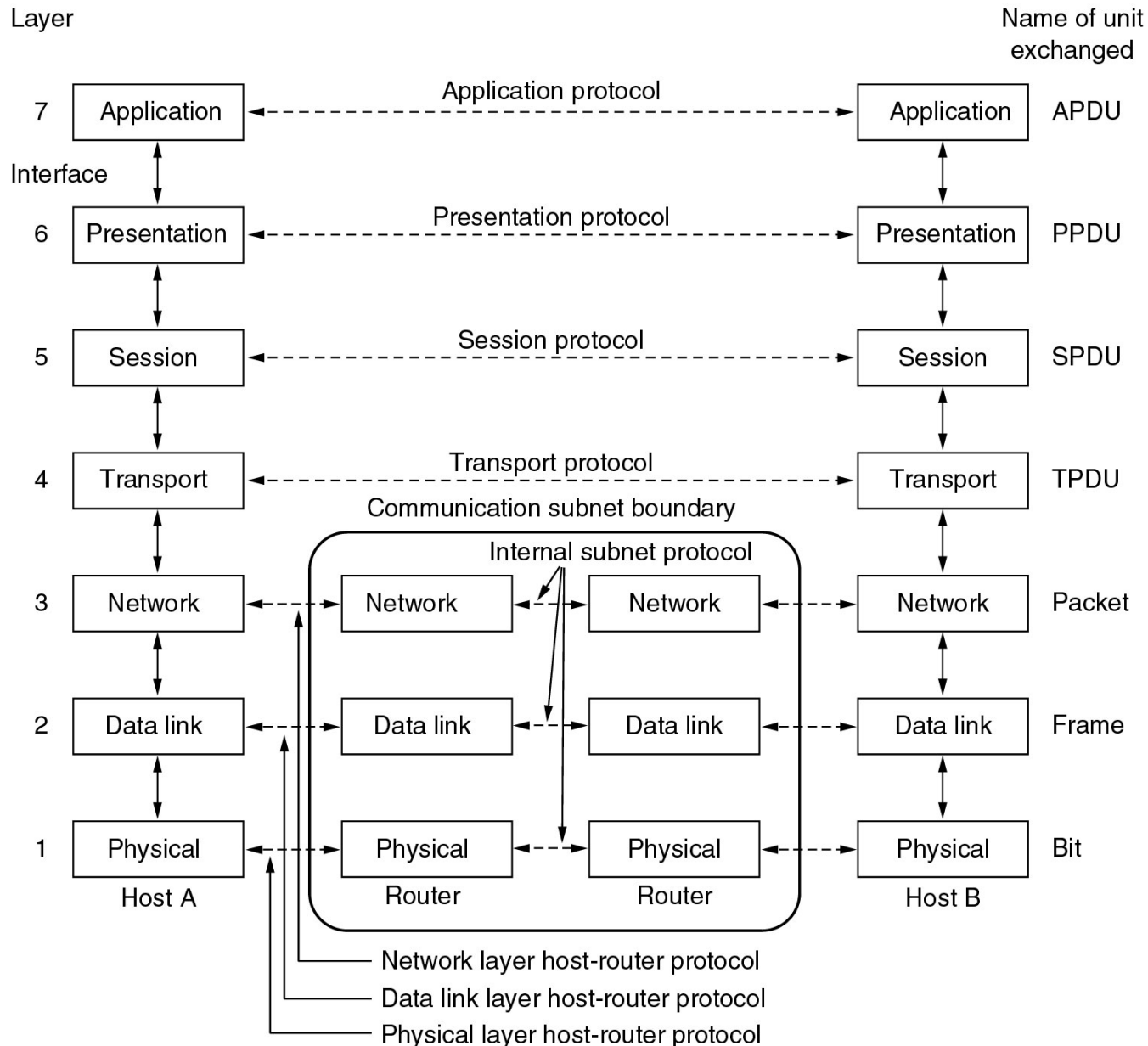
- 1974年，IBM宣布分层的网络体系结构 SNA (System Network Architecture)。
- 1977年，ISO提出开放系统互连参考模型 OSI (Open Systems Interconnection)-----七层协议的体系结构。

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



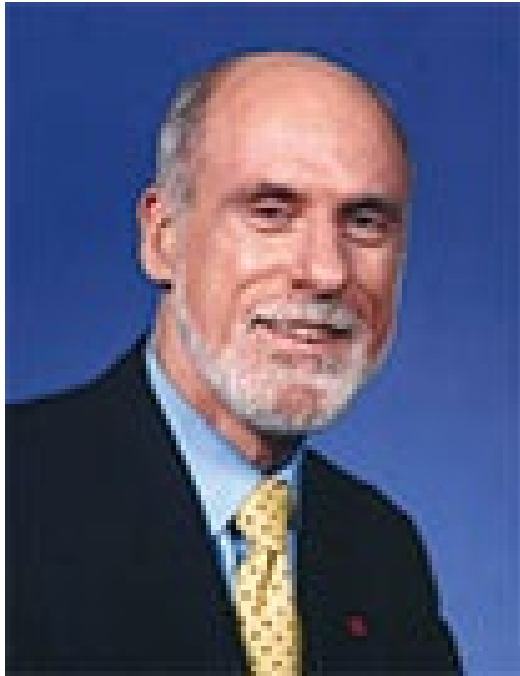
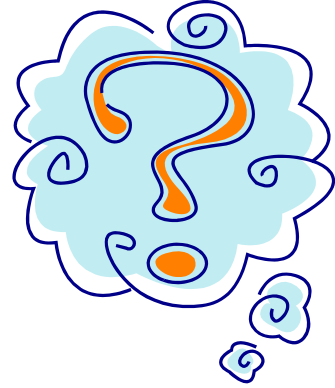
网络系统分层

- 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**

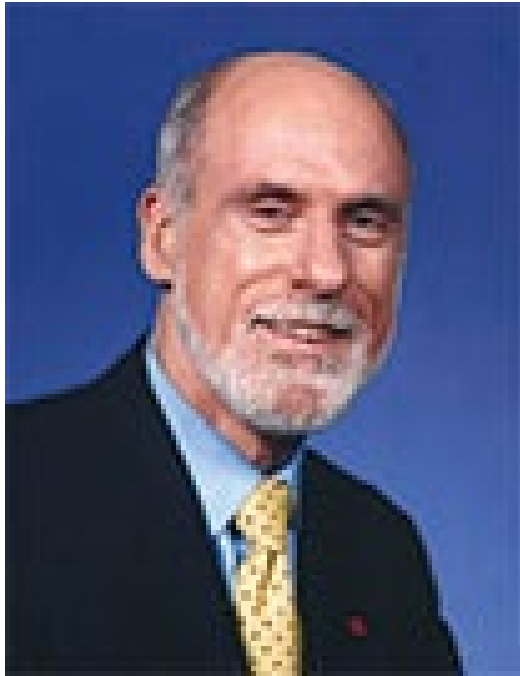
What is the Internet



**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**

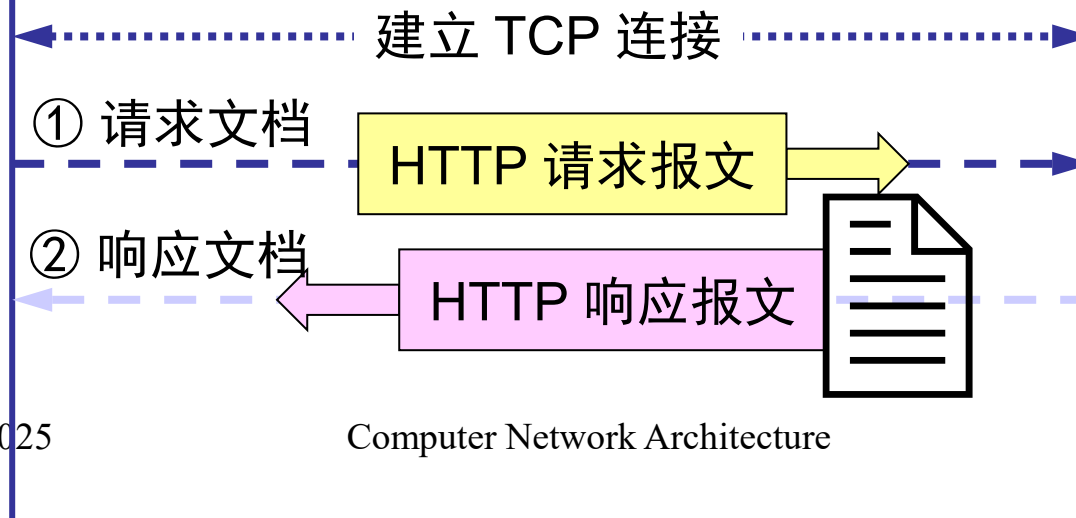
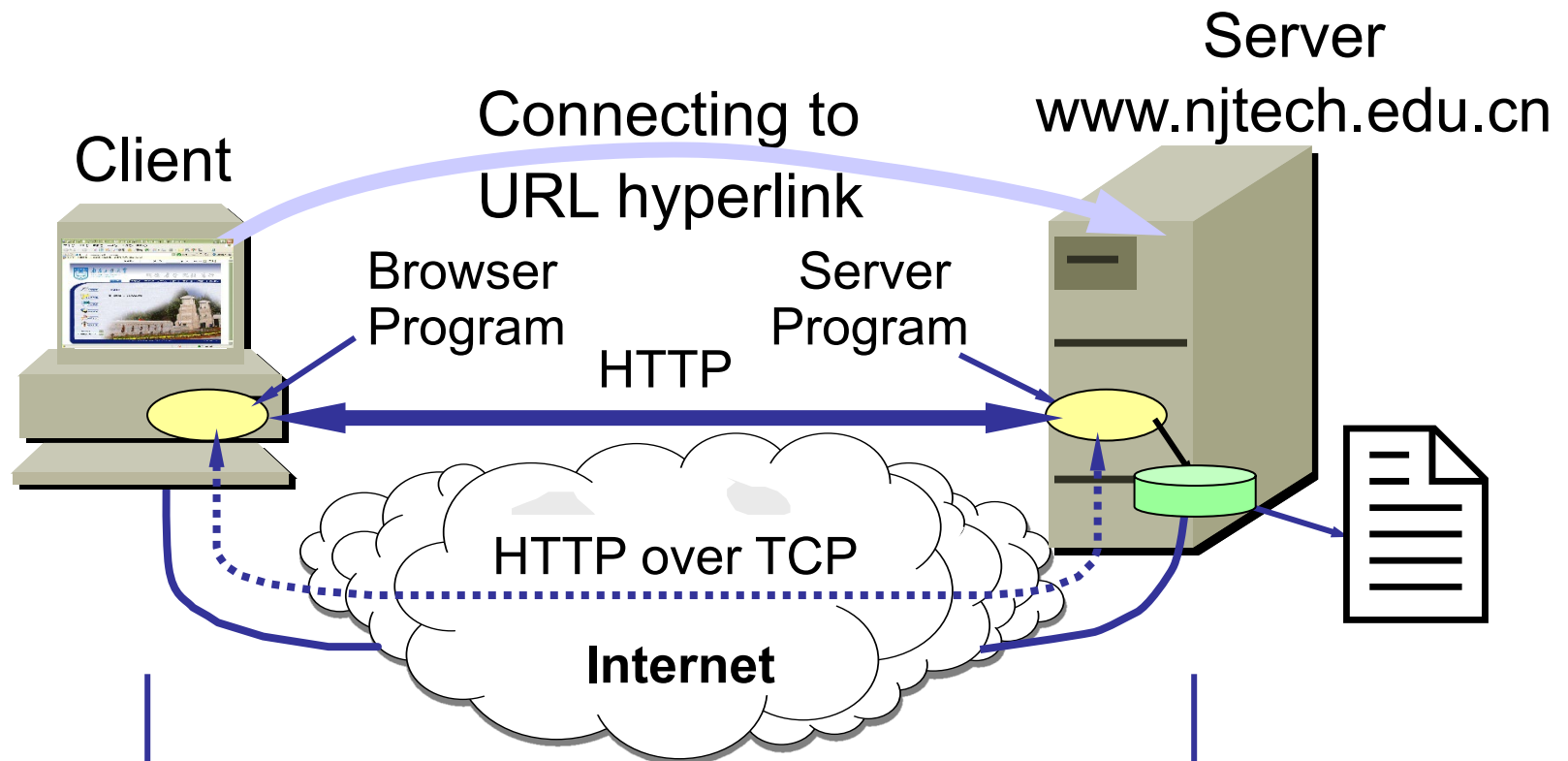
互联网技术

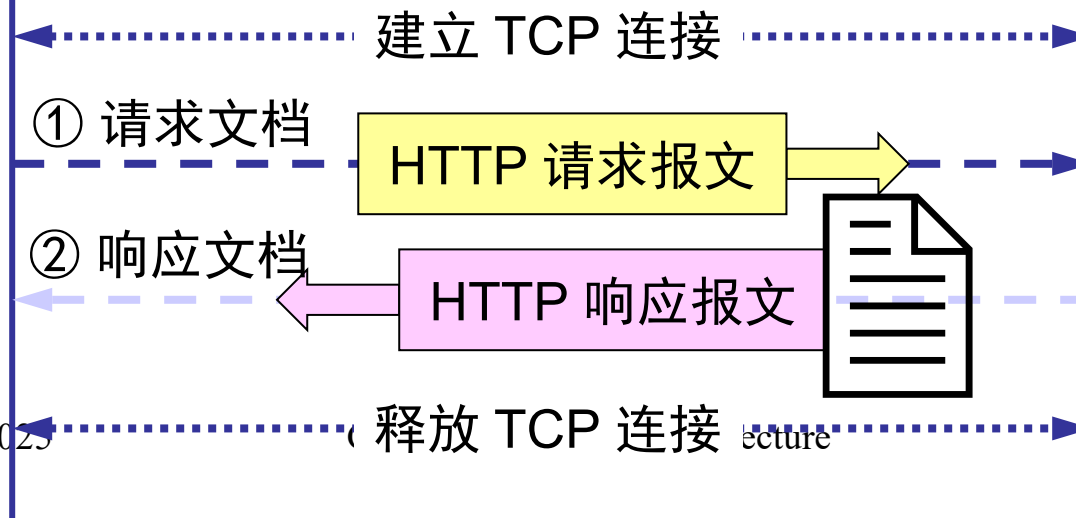
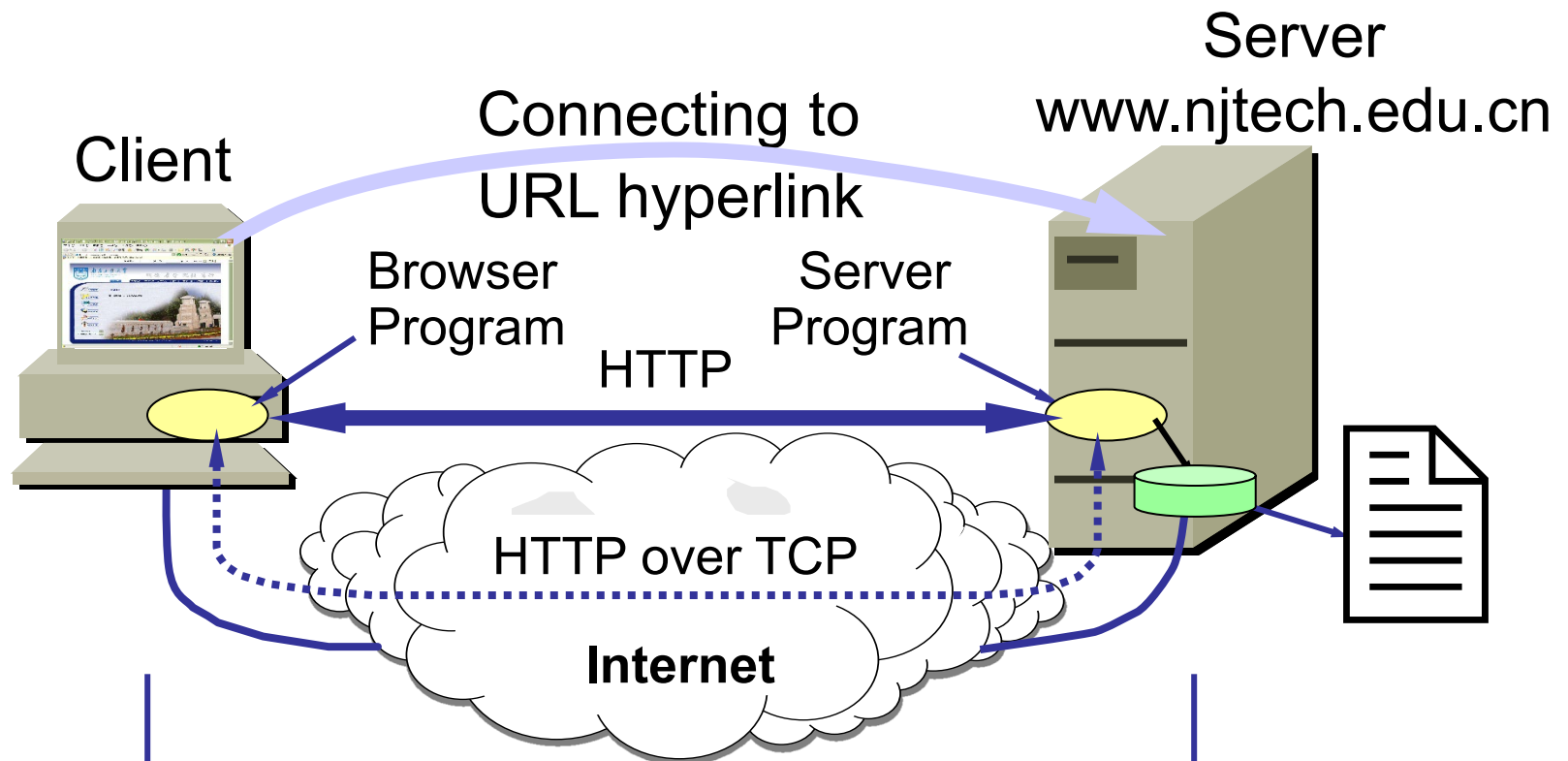
1989年夏天，Tim Berners-Lee提出客户机/服务器模式，开发出了世界上第一个Web服务器和第一个Web客户机。



Tim Berners-Lee

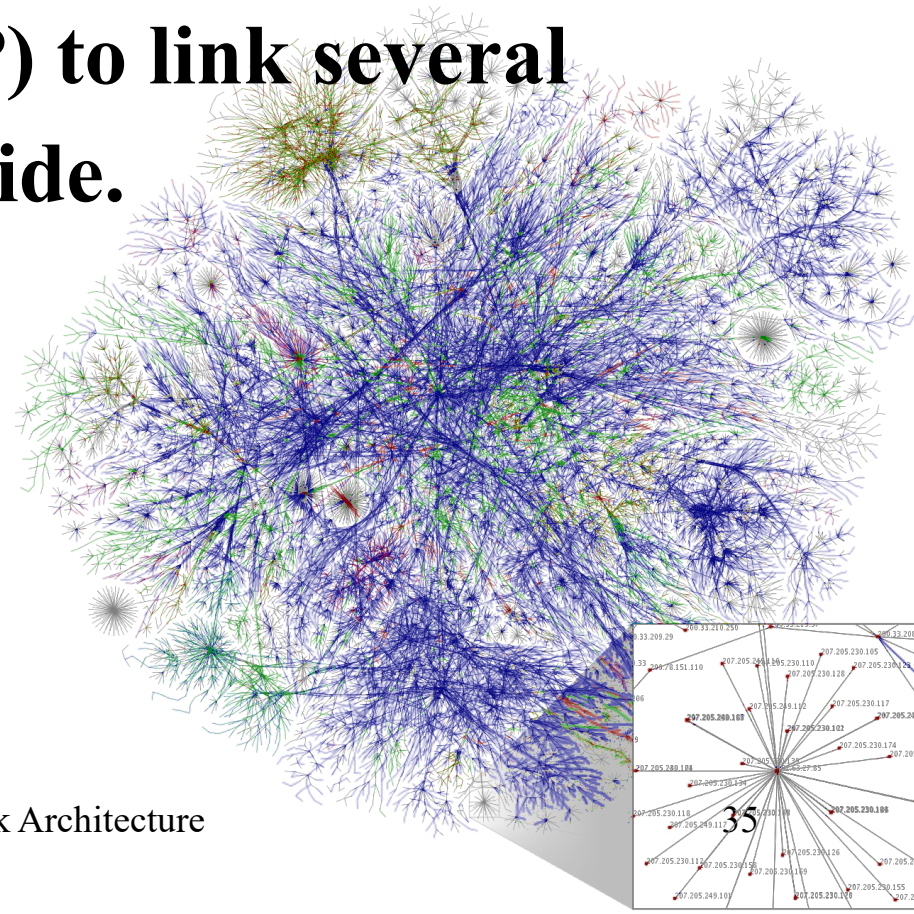
**1989年12月，定名为：
World Wide Web (WWW)**





The Internet

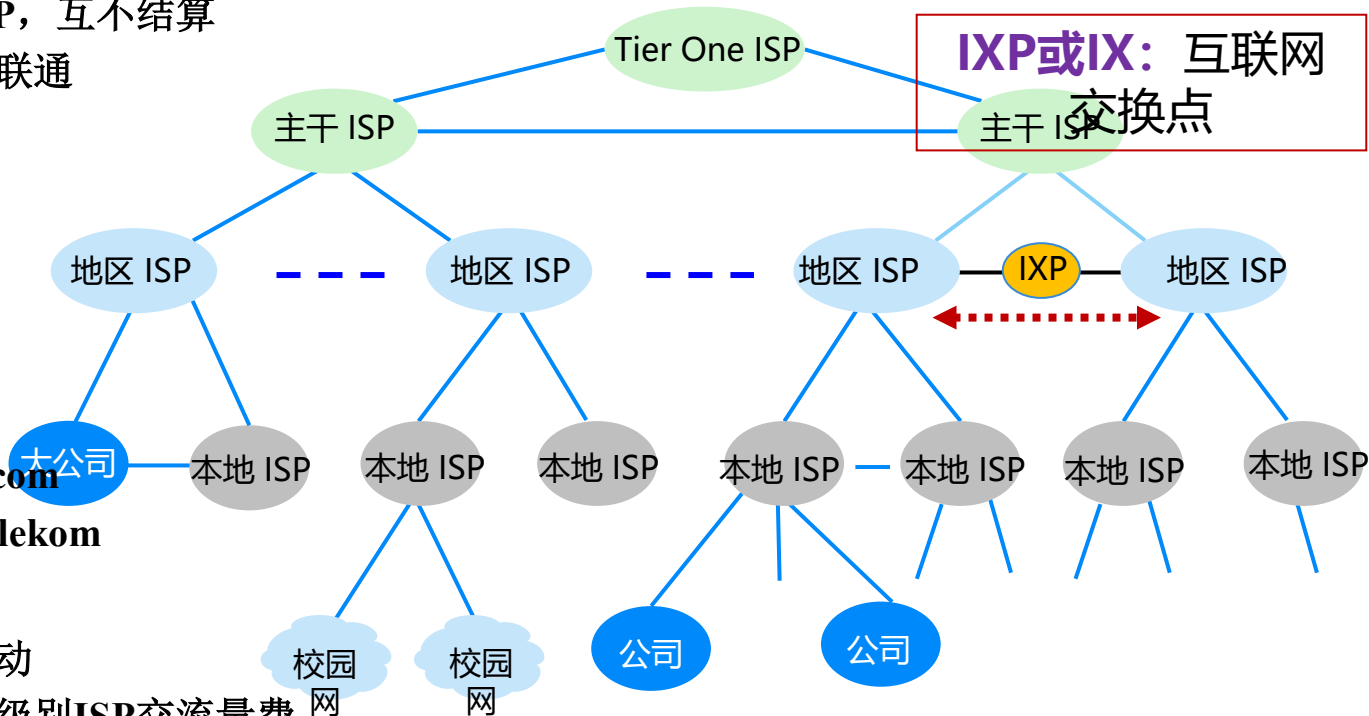
- a global system of interconnected computer networks that use the standard Internet protocol suite (TCP/IP) to link several billion devices worldwide.



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流量费

网络服务提供商 (ISP) 及层次化结构
(实际网络结构要复杂得多)

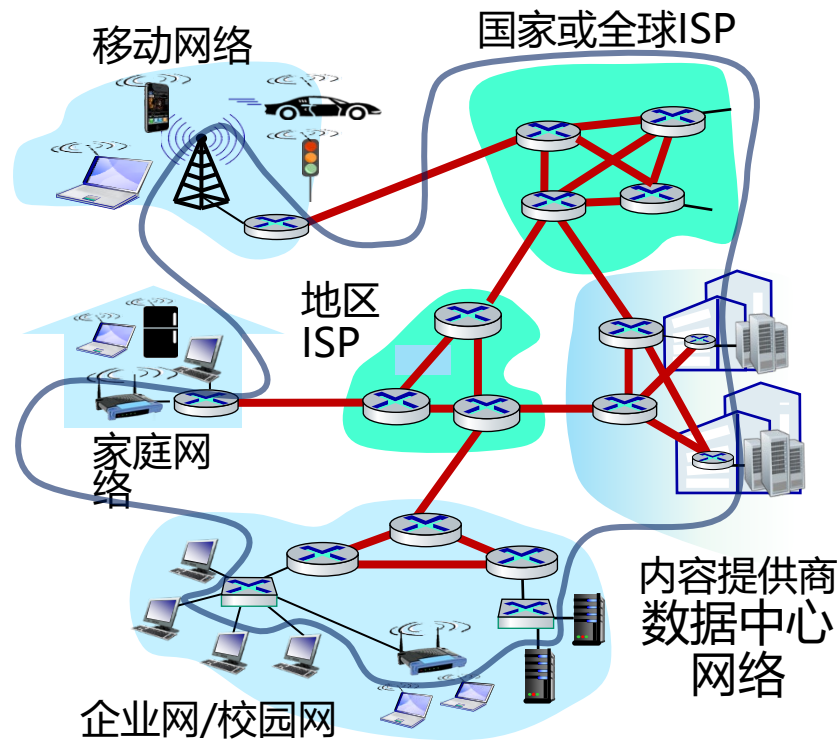
互联网的构成

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:  铜缆、无: 、激光链路)



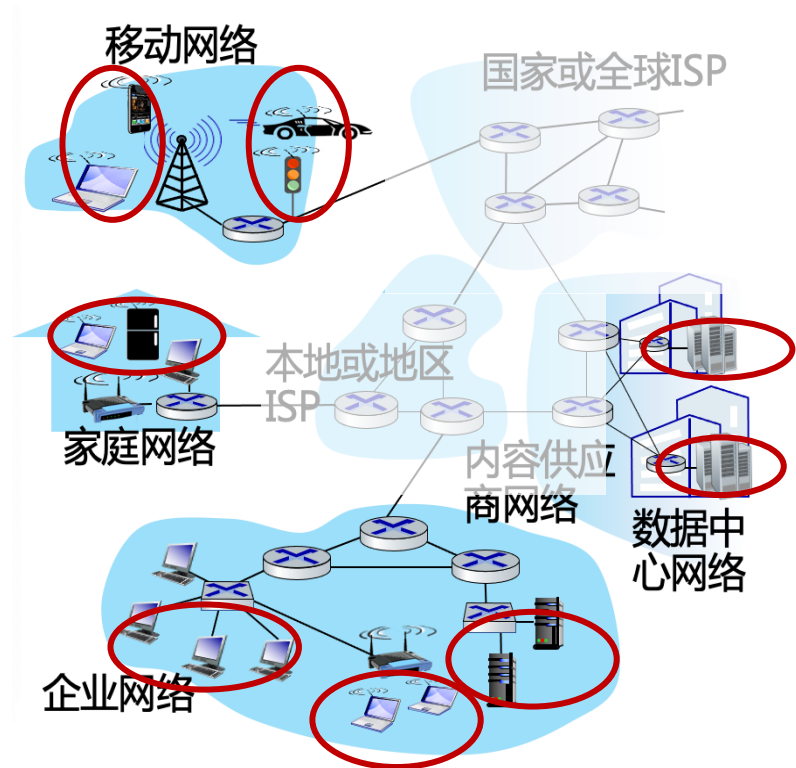
网络边缘

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

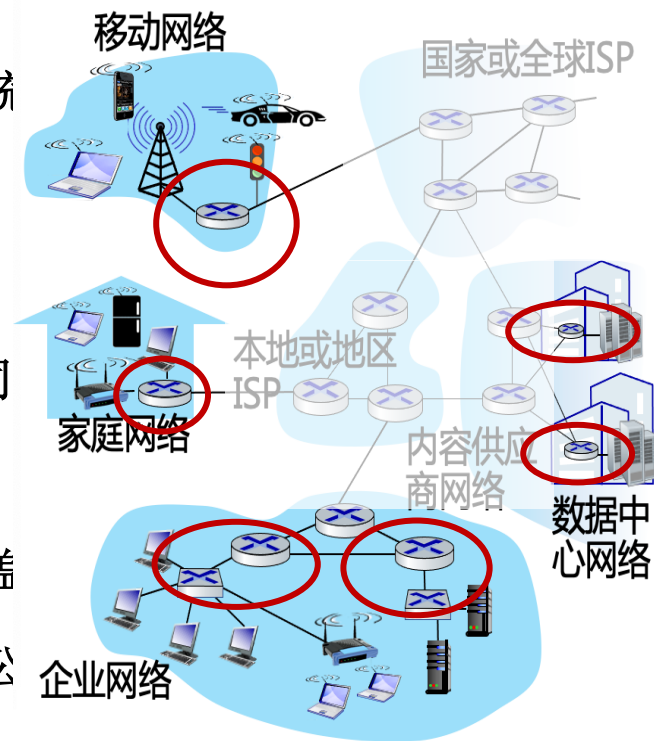
接入网概述

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

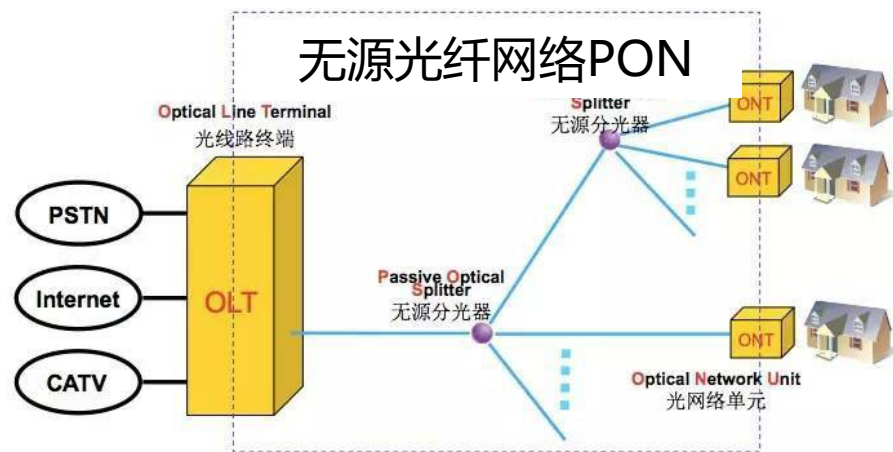
a) 光纤到户FTTH

- **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

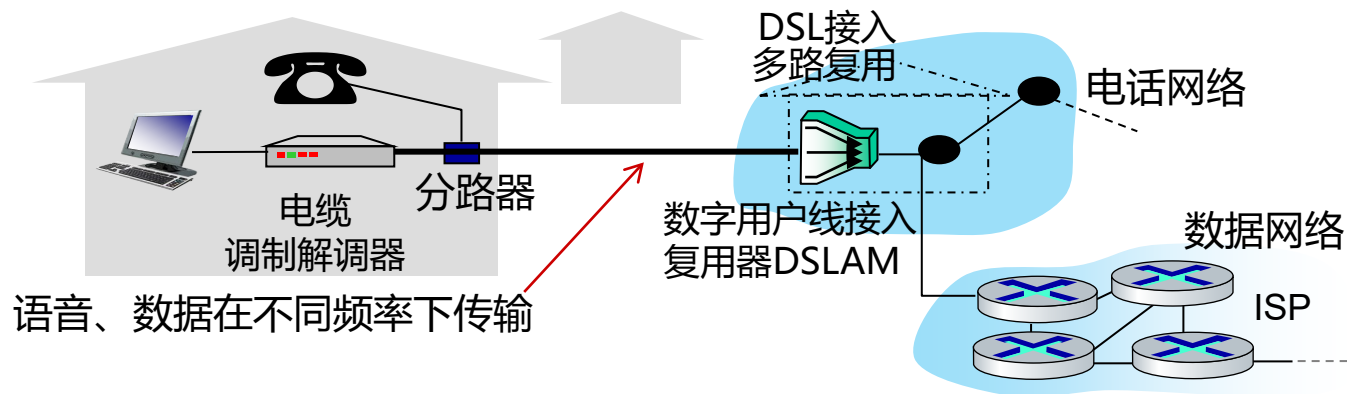
- **PON: Passive Optical Network**
- **OLT: 局端的光线路终端**
- **ONU光网络单元（如光猫ONT）**
- 光猫ONT通过一个或多个无源分光器，连接到局端的光线路终端OLT



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

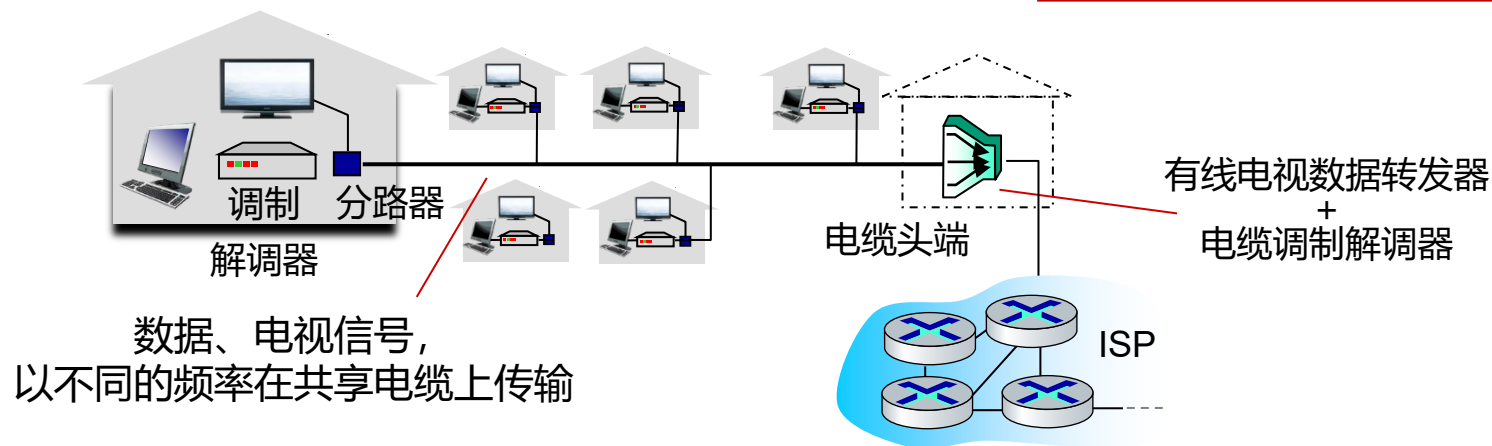
a) 同轴电缆：Cable

- 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

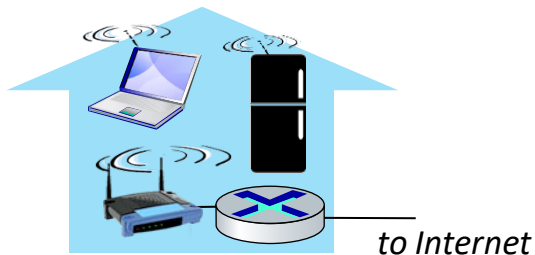
我国已广泛升级为FTTH，
美国住宅依然有80%多使用
DSL和同轴电缆接入☹



接入网：无线接入

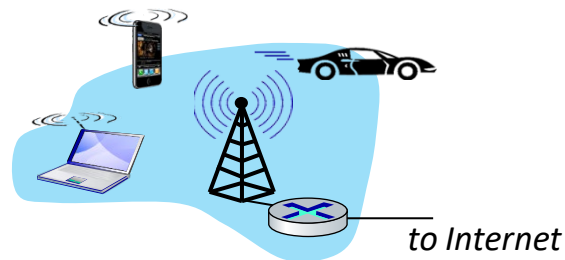
无线局域网 (WLAN)

- 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

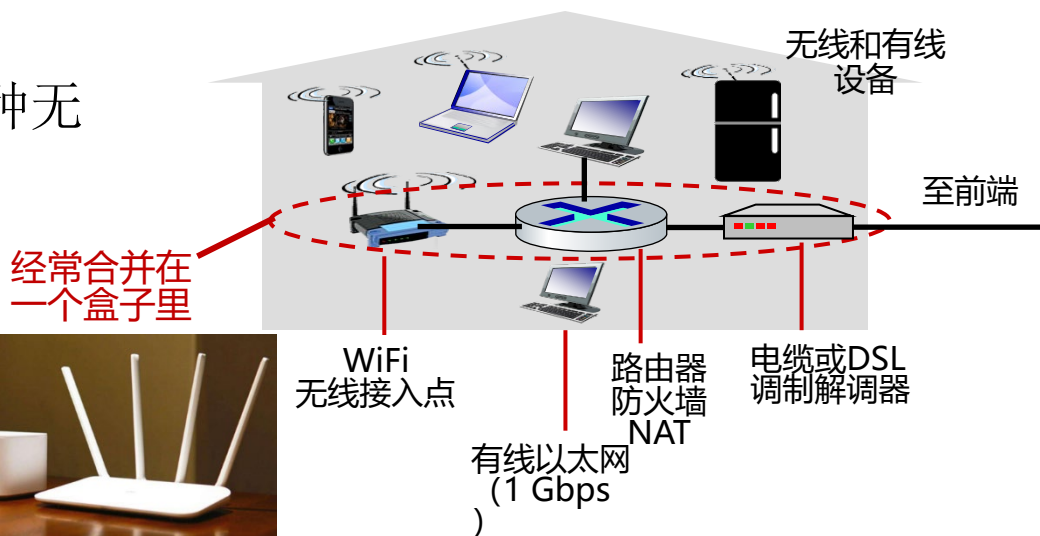
b) 有线以太网接入

- 100Mbps、1Gbps、10Gbps等接入速率

c) 无线WiFi接入

- 11、54、450Mbps等

校园、企业、家庭等网络



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?

- 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.
- 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

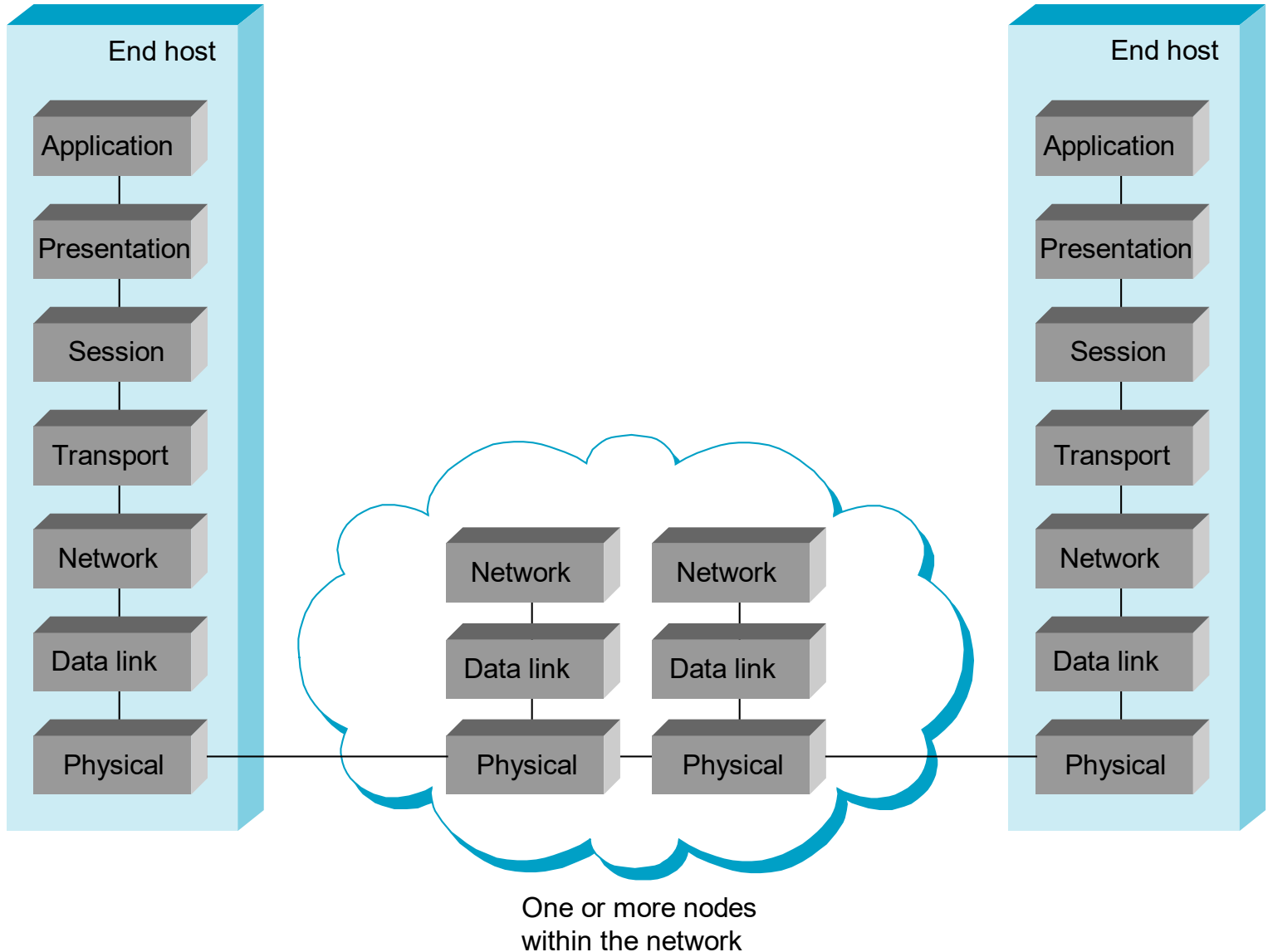
会话层

运输层

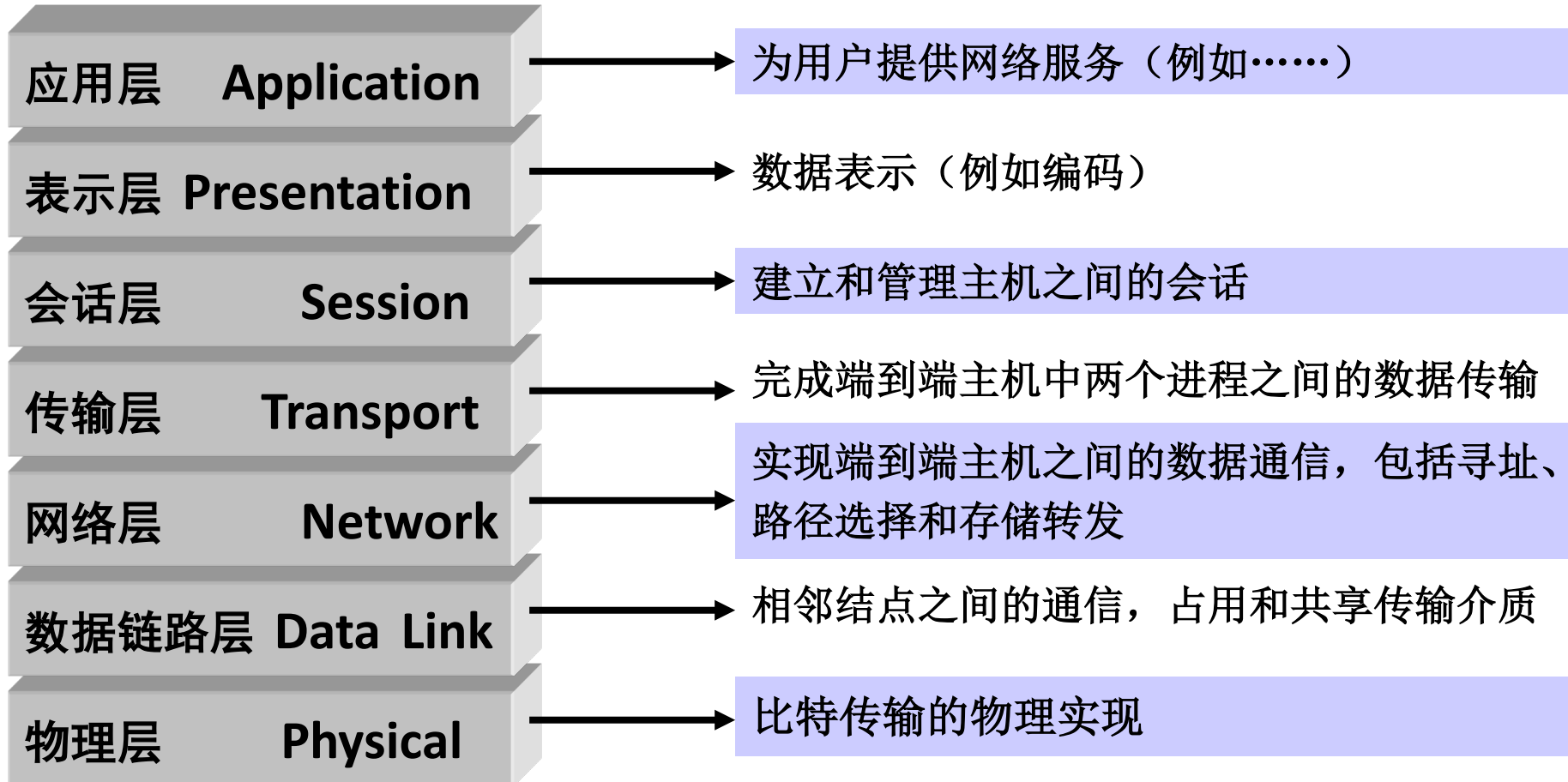
网络层

数据链路层

物理层

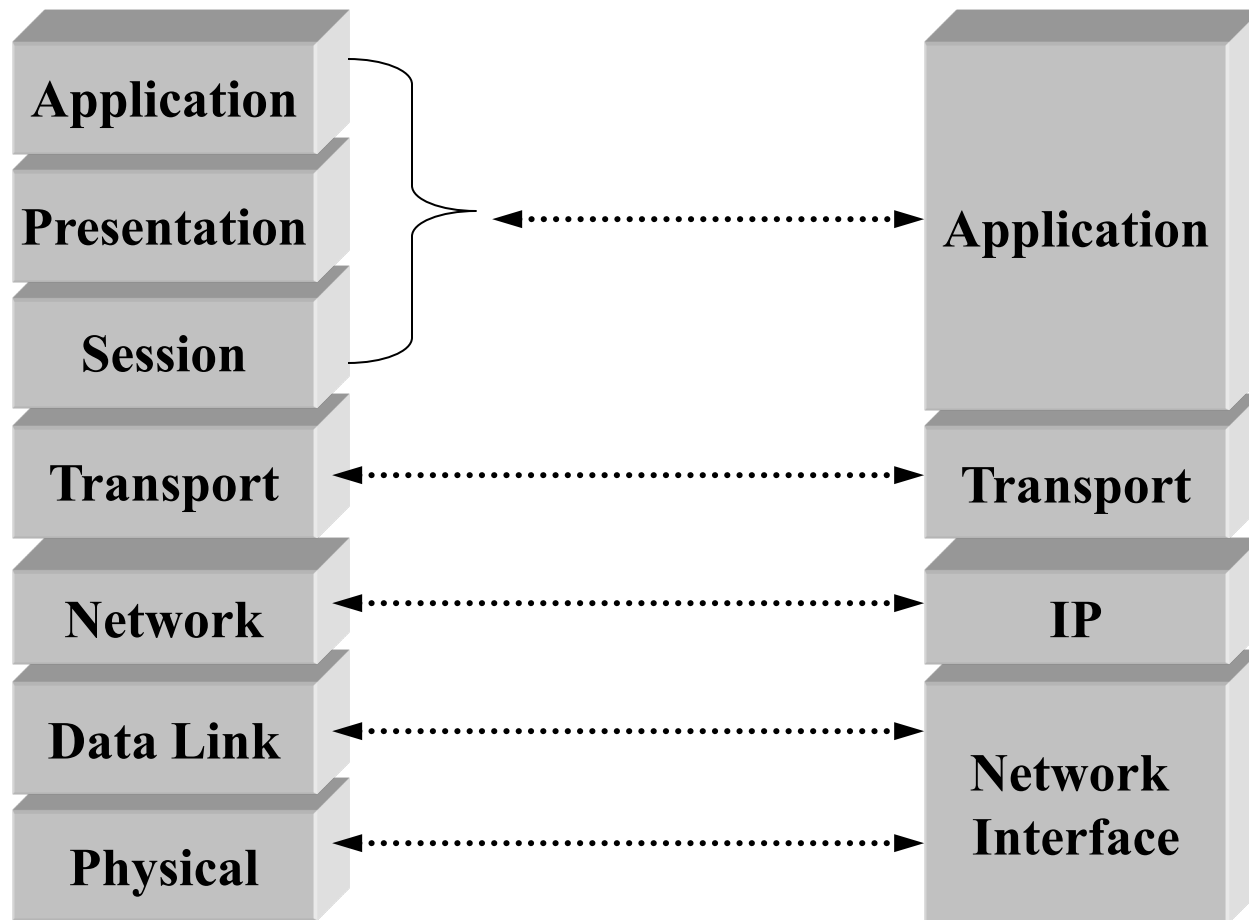


The OSI Reference Model



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

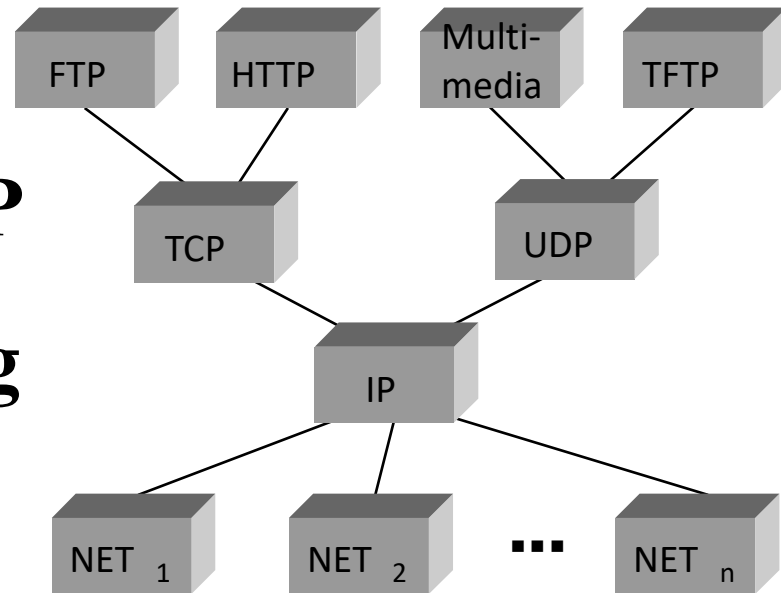
- The TCP/IP Architecture was defined by IETF

- Transparent Design

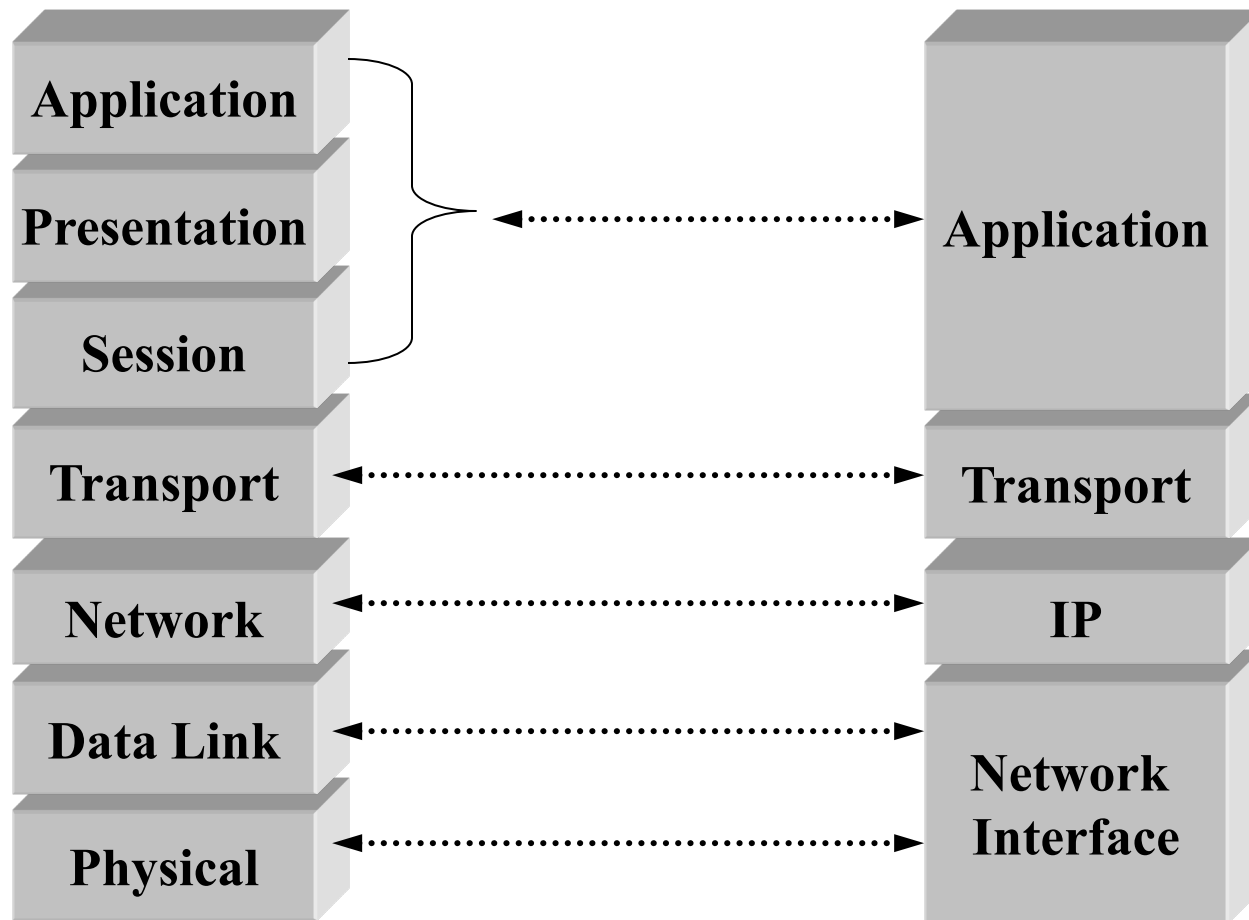
- ♠ Everything over IP

- ♠ IP over Everything

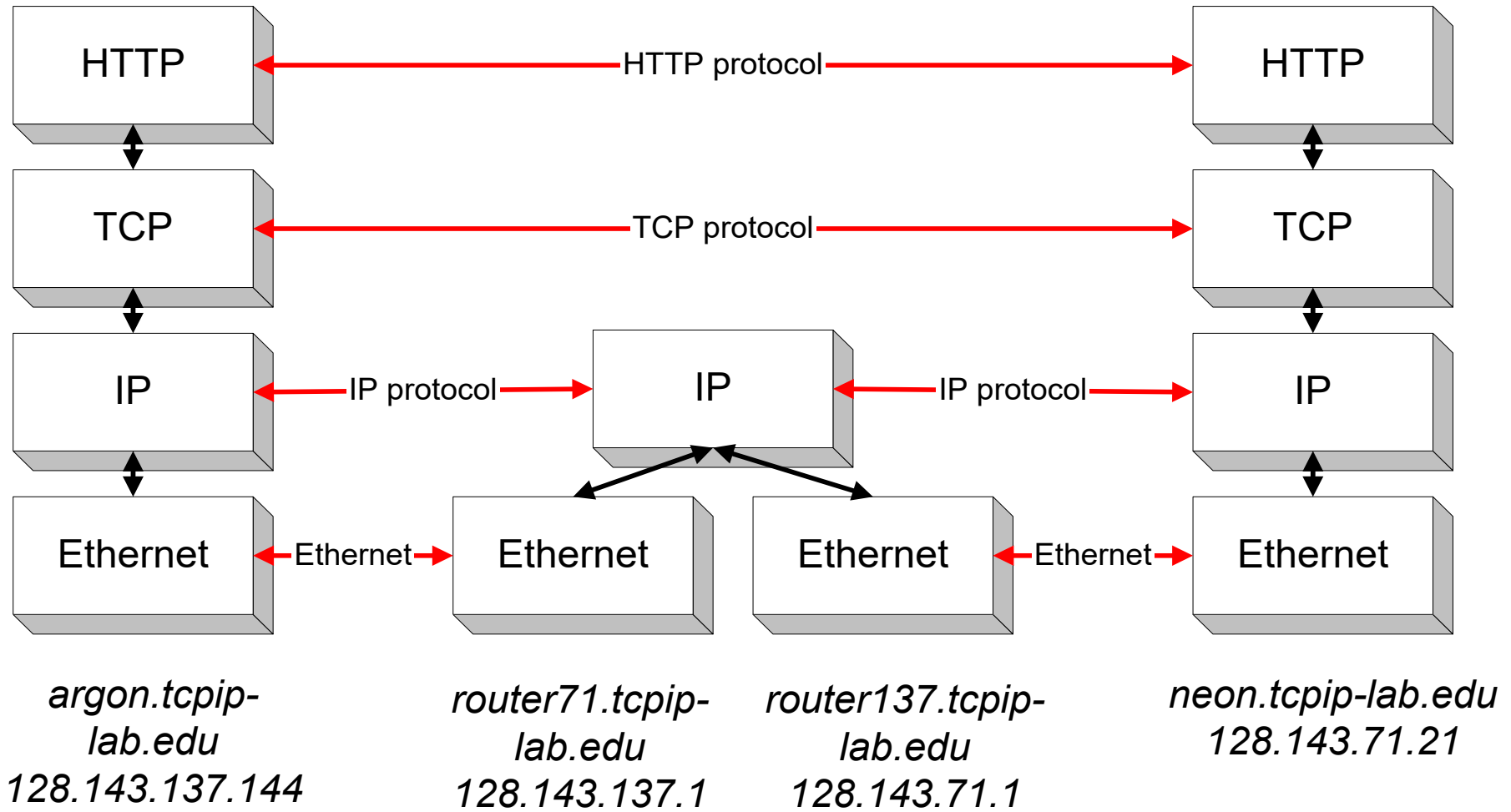
- ♠ Best-effort



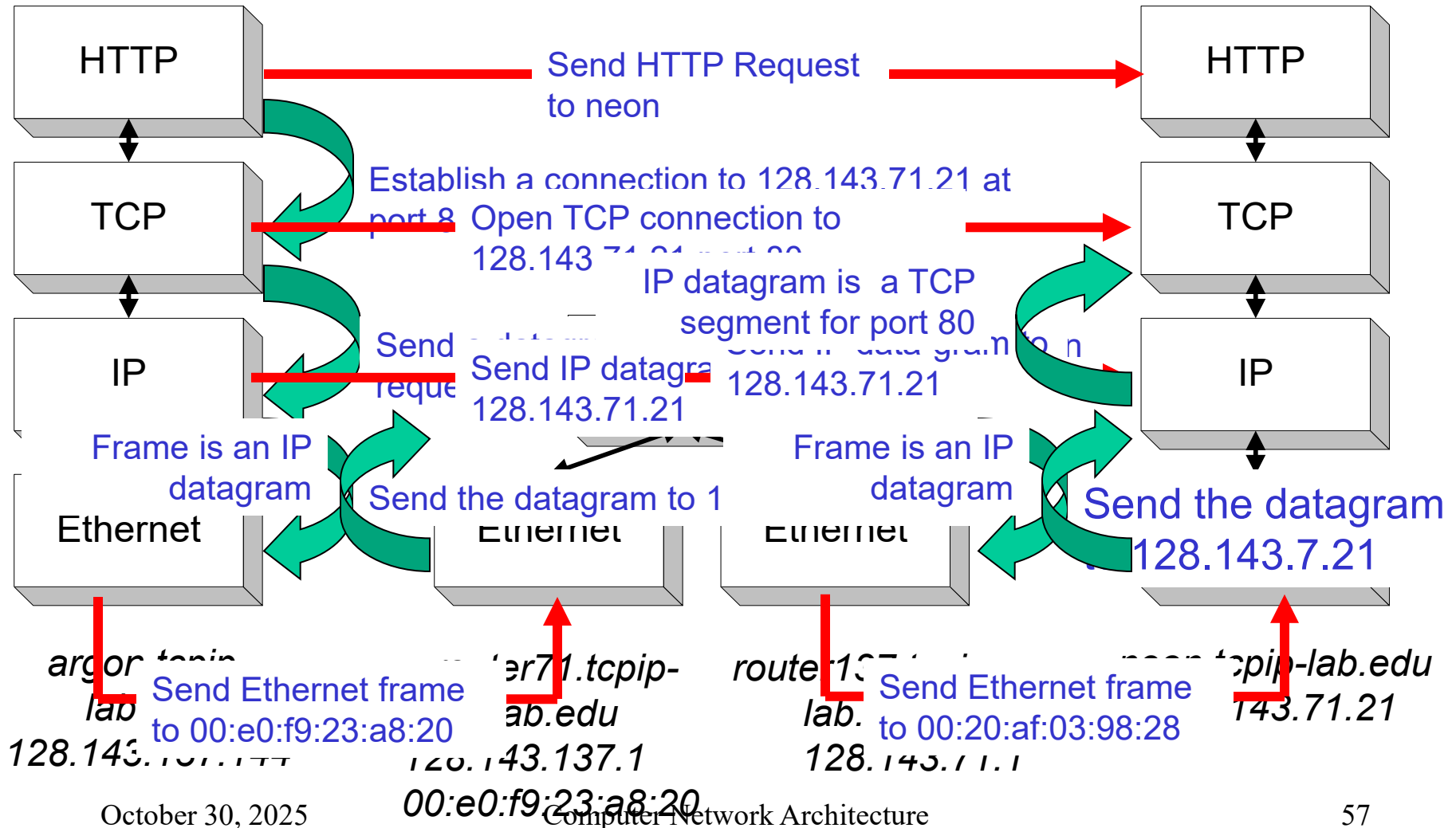
Comparison: OSI and TCP/IP



Layers in the Example

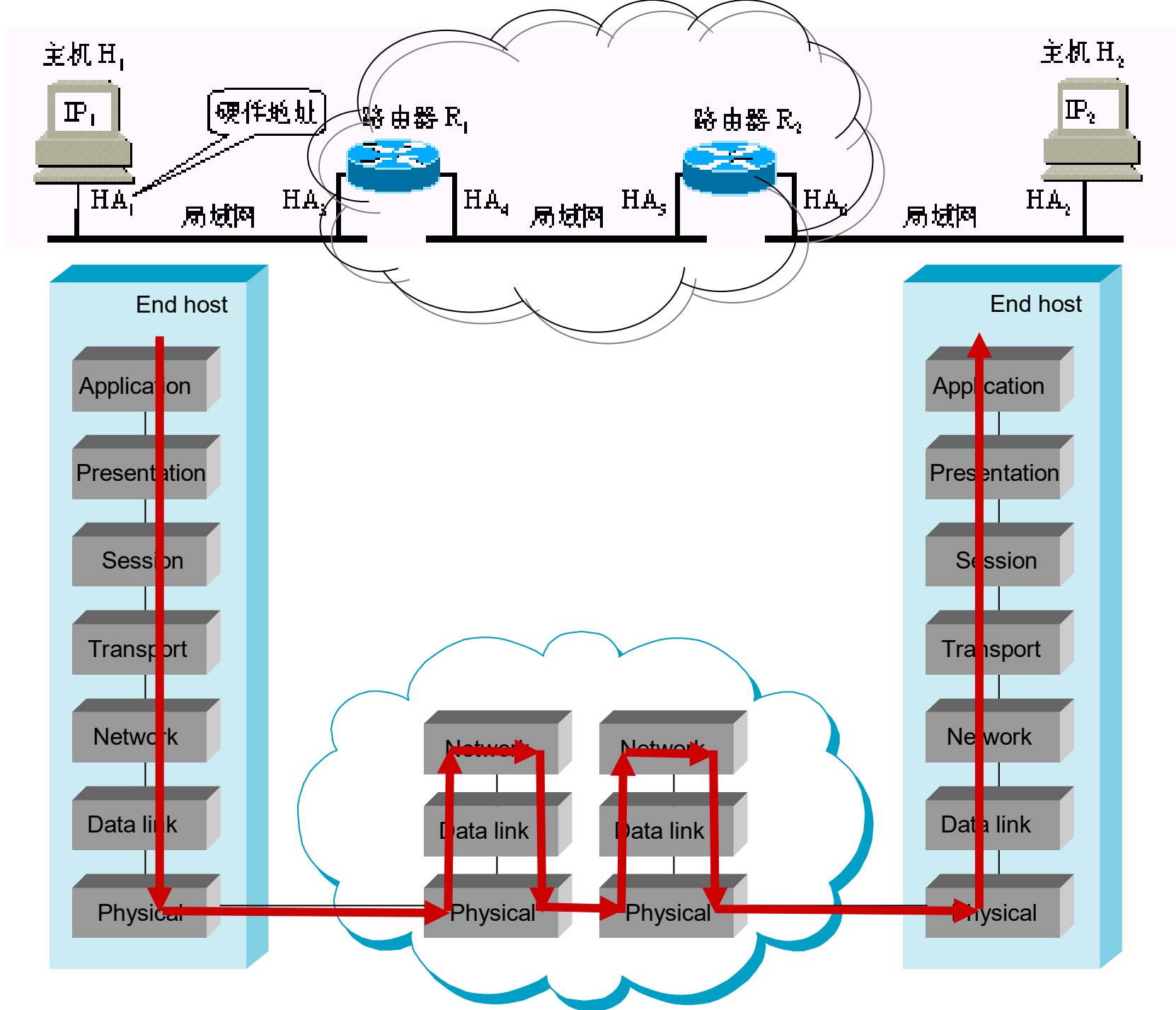


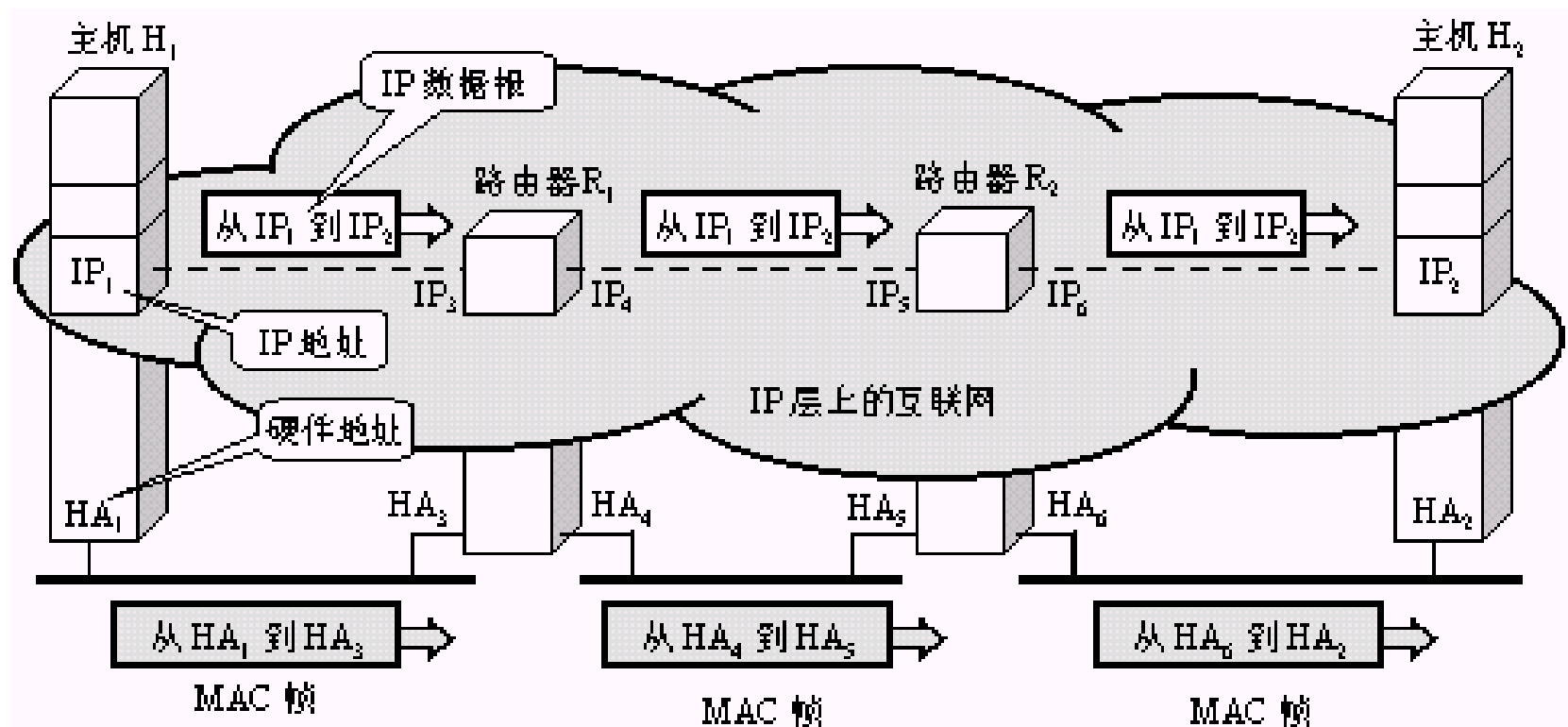
Layers in the Example



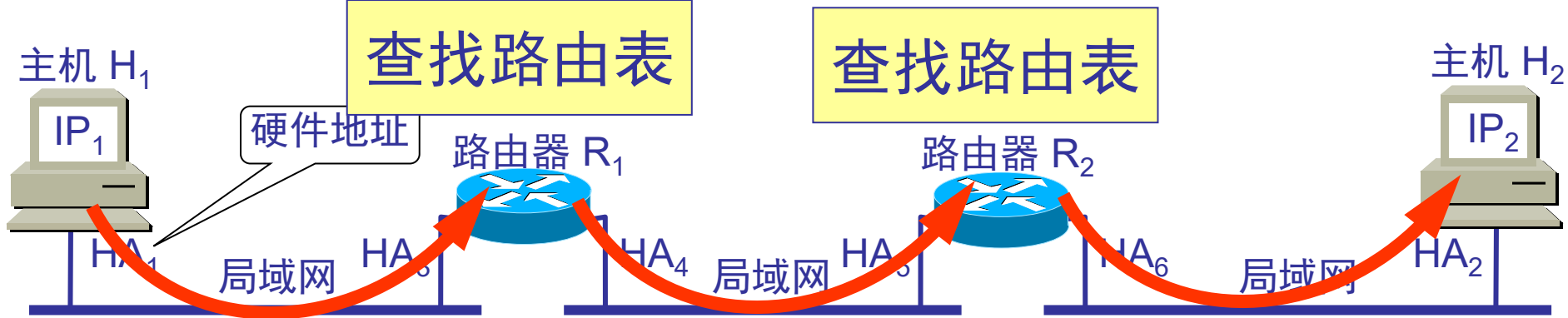
Layers and Services

- **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





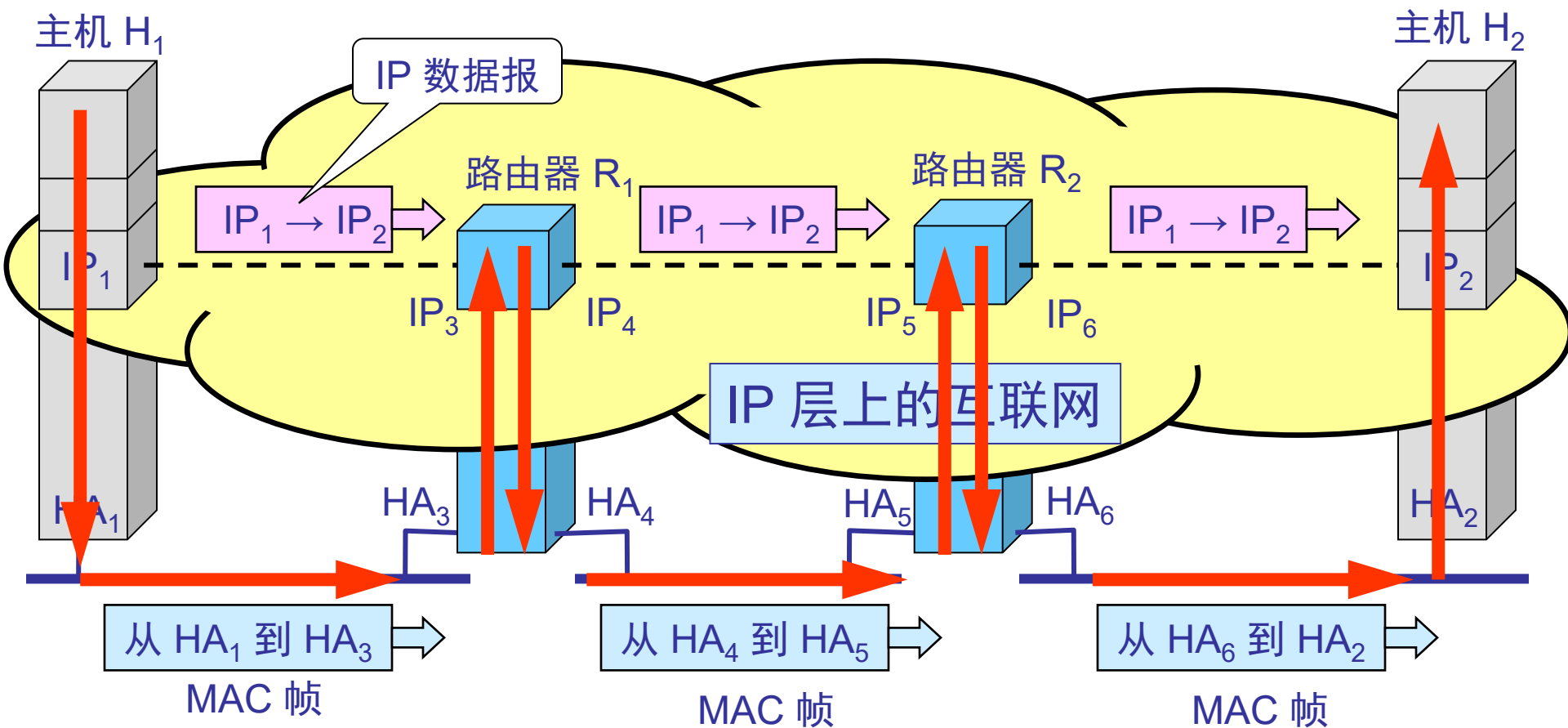
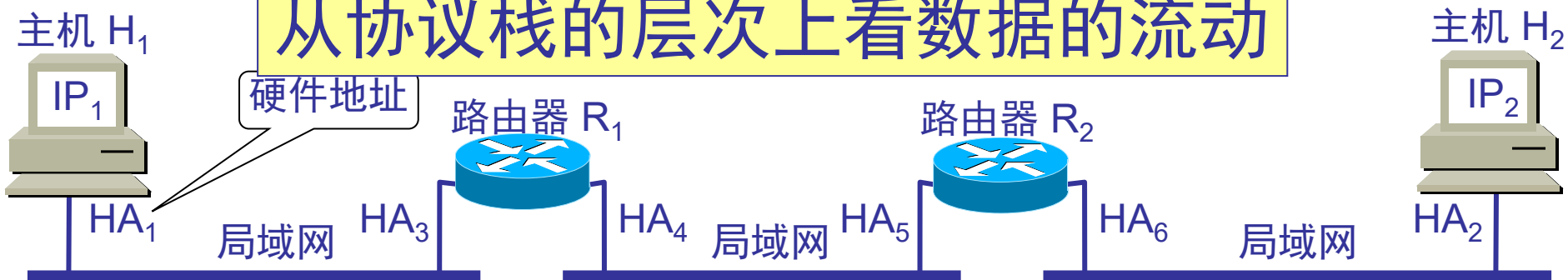
从不同层次上看 IP 地址和硬件地址



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



主机 H_1



路由器 R₁

路由器 R₂

主机 H₂

IP 层上的互联网

从 HA_1 到 HA_3

MAC 帧

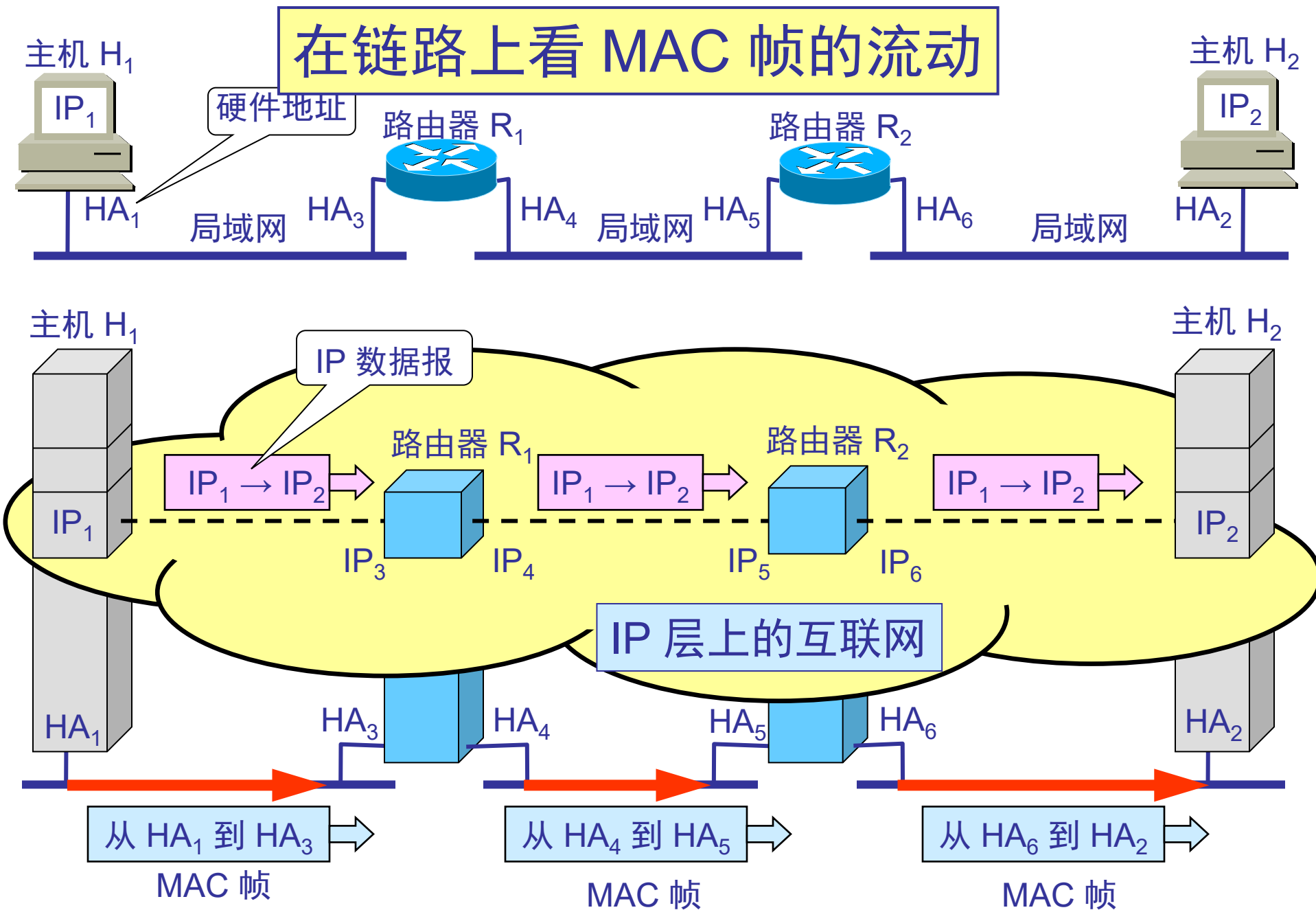
从 HA_4 到 HA_5

MAC 帧

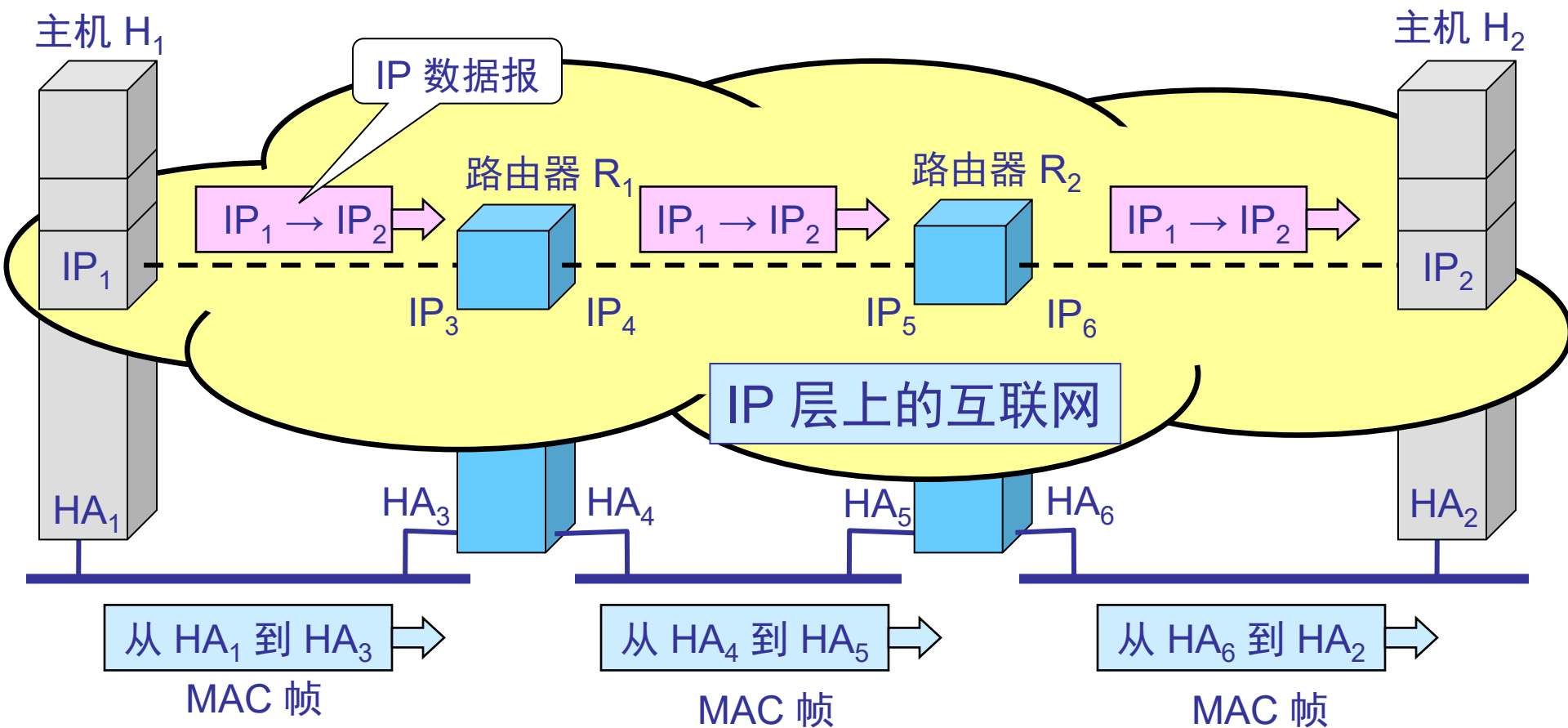
从 HA_6 到 HA_2

MAC 帧

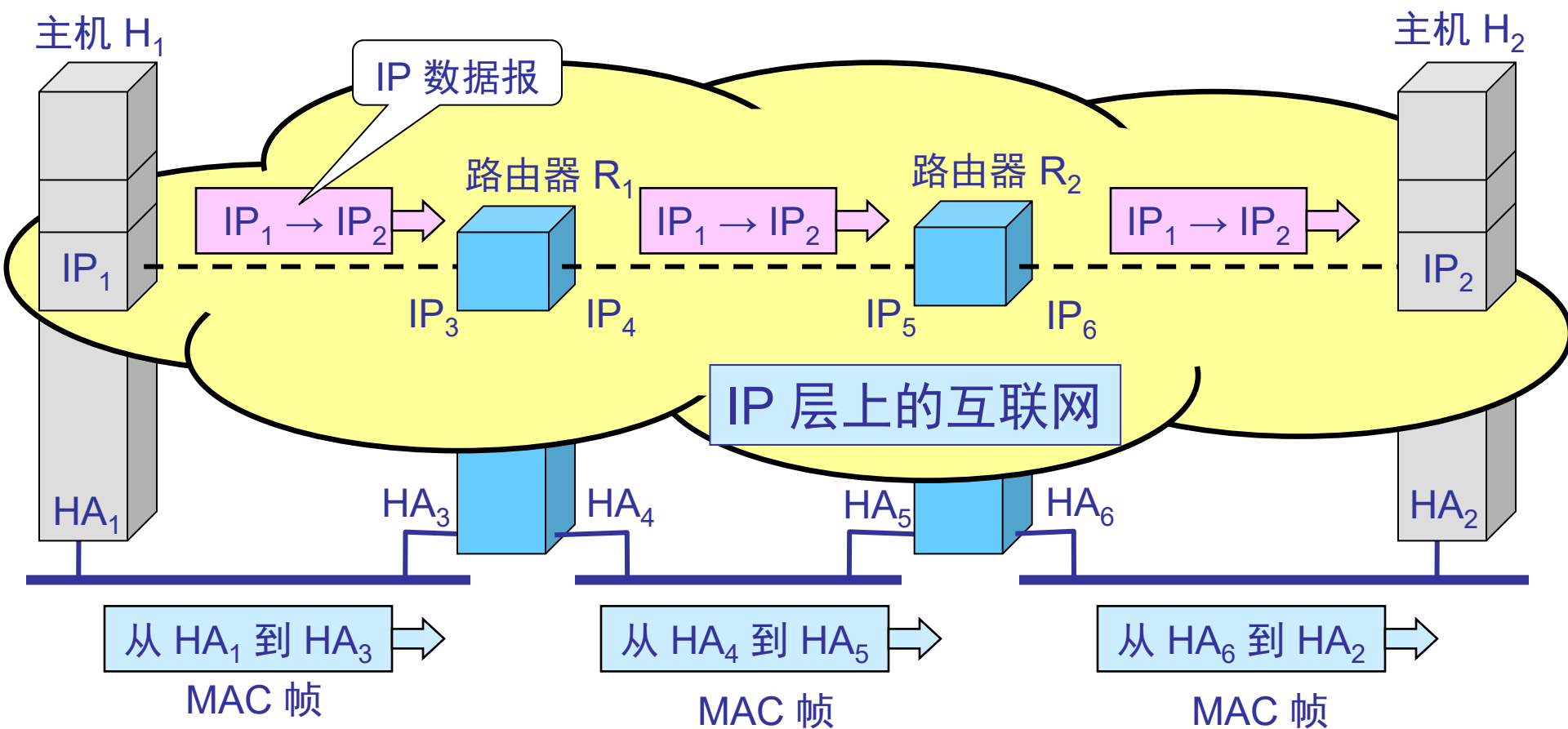
在链路上看 MAC 帧的流动



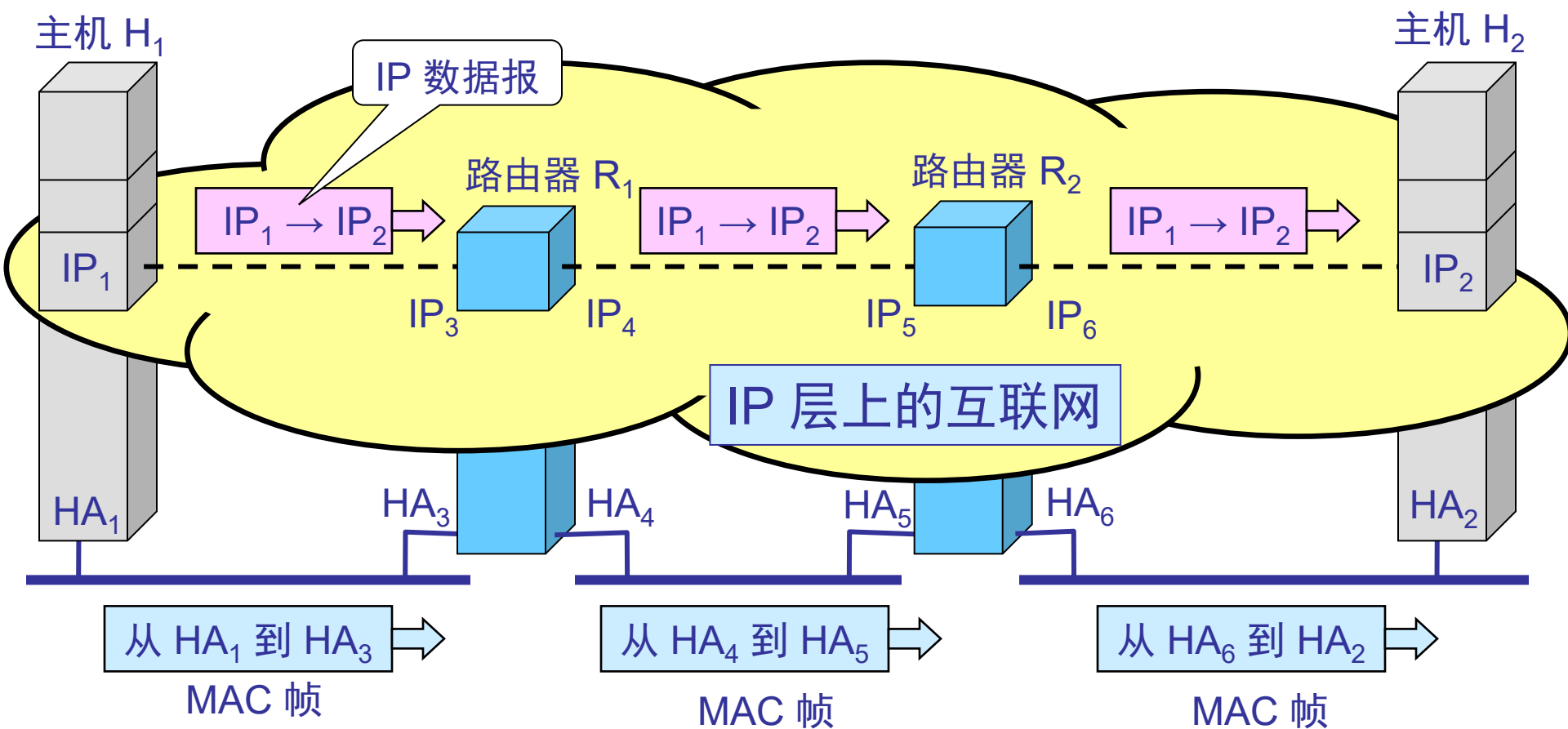
在 IP 层抽象的互联网上只能看到 IP 数据报
图中的 $IP_1 \rightarrow IP_2$ 表示从源地址 IP_1 到目的地址 IP_2
两个路由器的 IP 地址并不出现在 IP 数据报的首部中



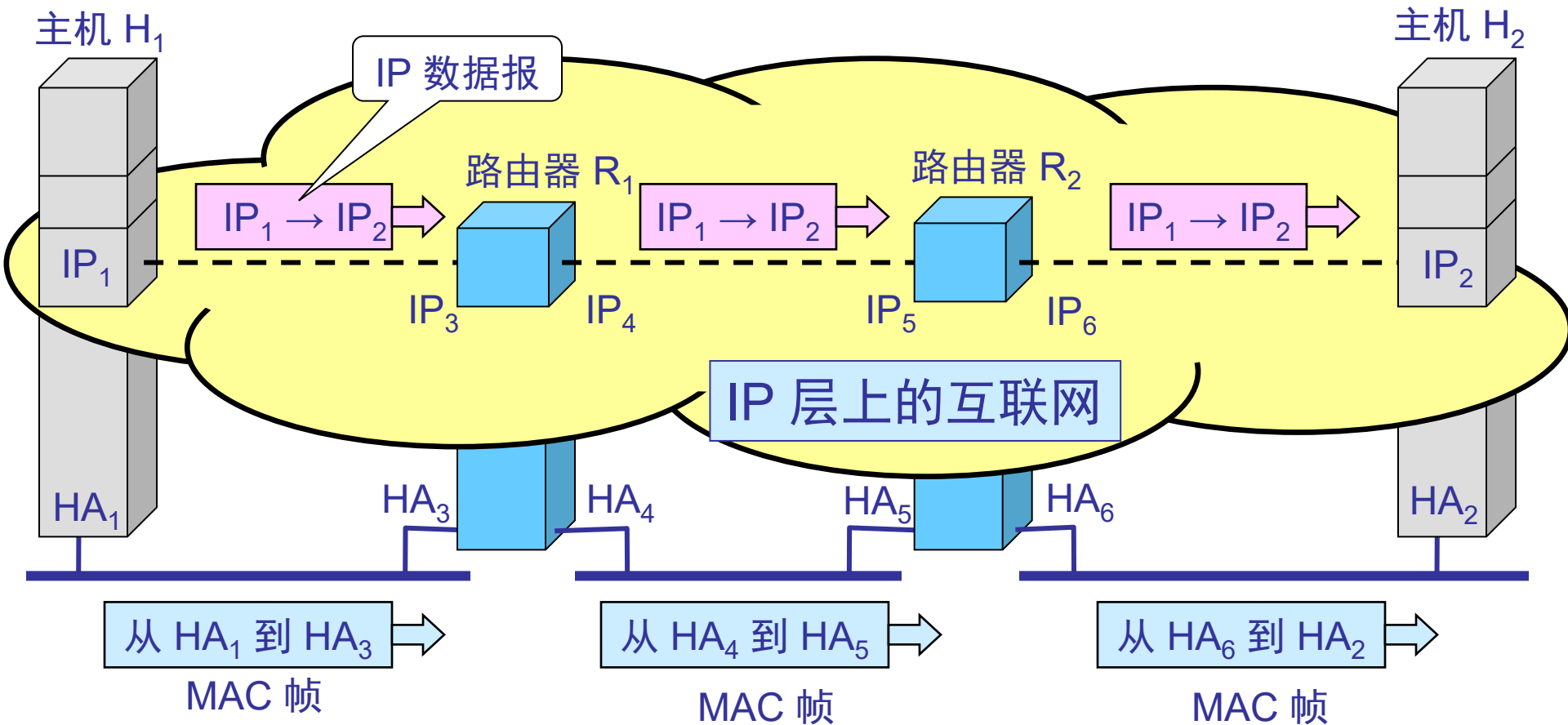
路由器只根据目的站的 IP 地址的网络号进行路由选择



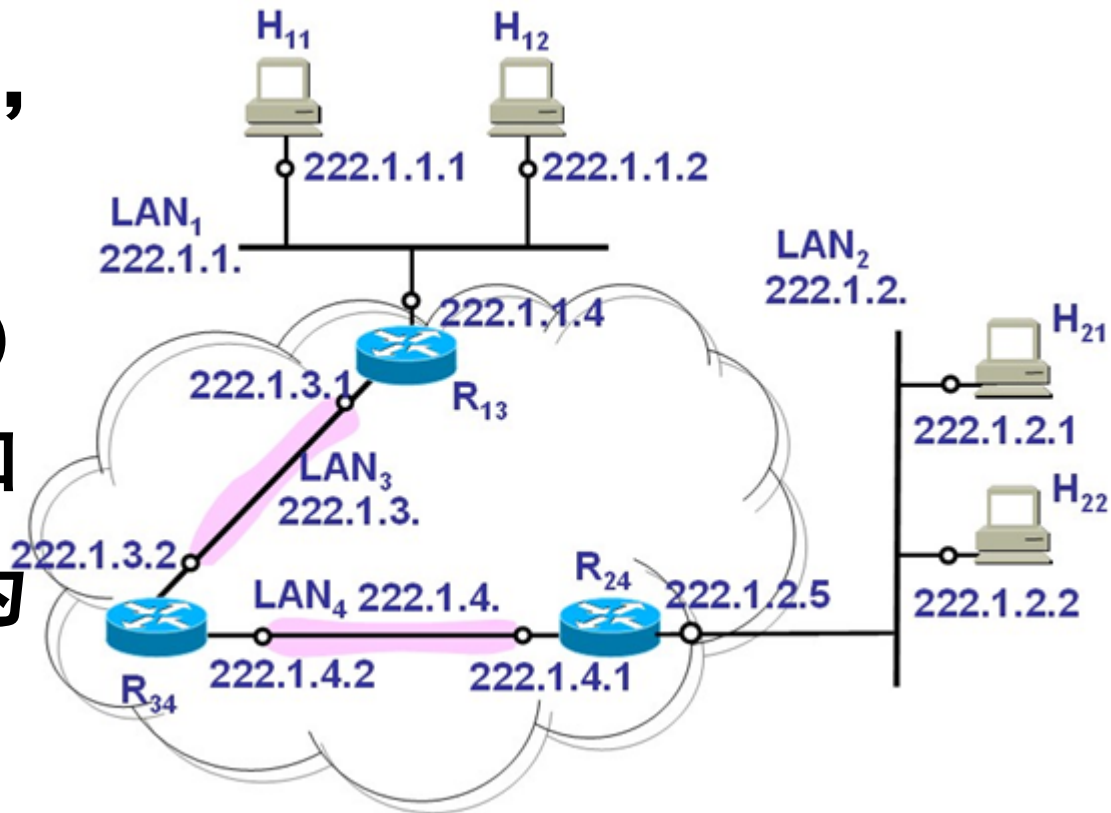
在具体的物理网络的链路层
只能看见 MAC 帧而看不见 IP 数据报



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

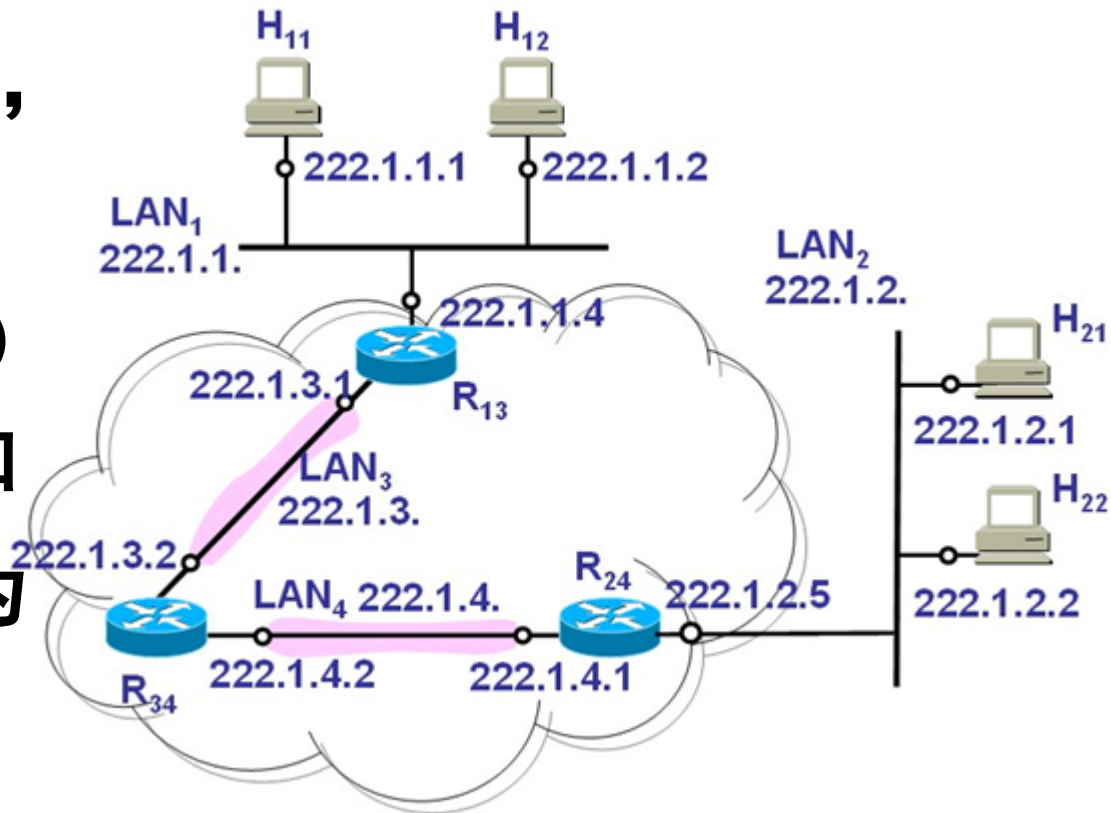


课堂练习：如图所示，
四个局域网(LAN₁,
LAN₂, LAN₃和LAN₄)
通过路由器R₁₃, R₂₄和
R₃₄互联。子网掩码为
255.255.255.0



(1)试问主机H₂₁和H₂₂的默认网关地址是多少？

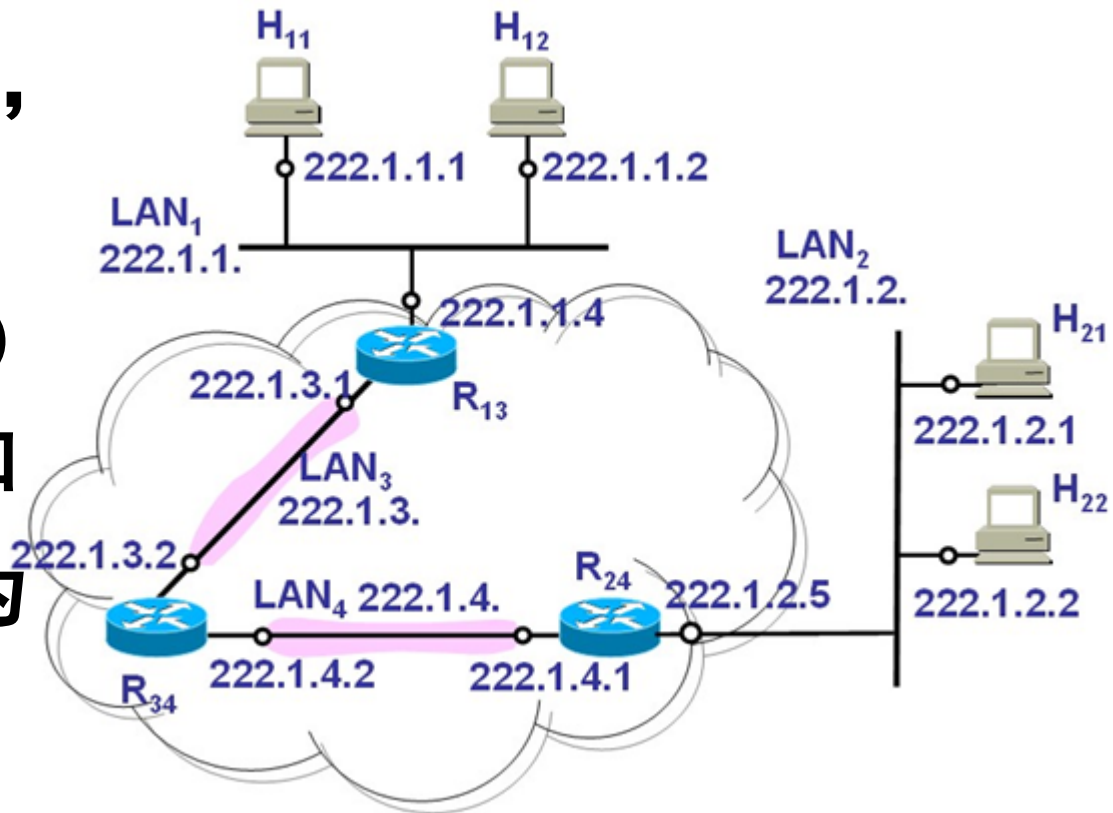
课堂练习：如图所示，四个局域网(LAN₁, LAN₂, LAN₃和LAN₄)通过路由器R₁₃, R₂₄和R₃₄互联。子网掩码为255.255.255.0



(1)试问主机H₂₁和H₂₂的默认网关地址是多少？

答：222.1.2.5

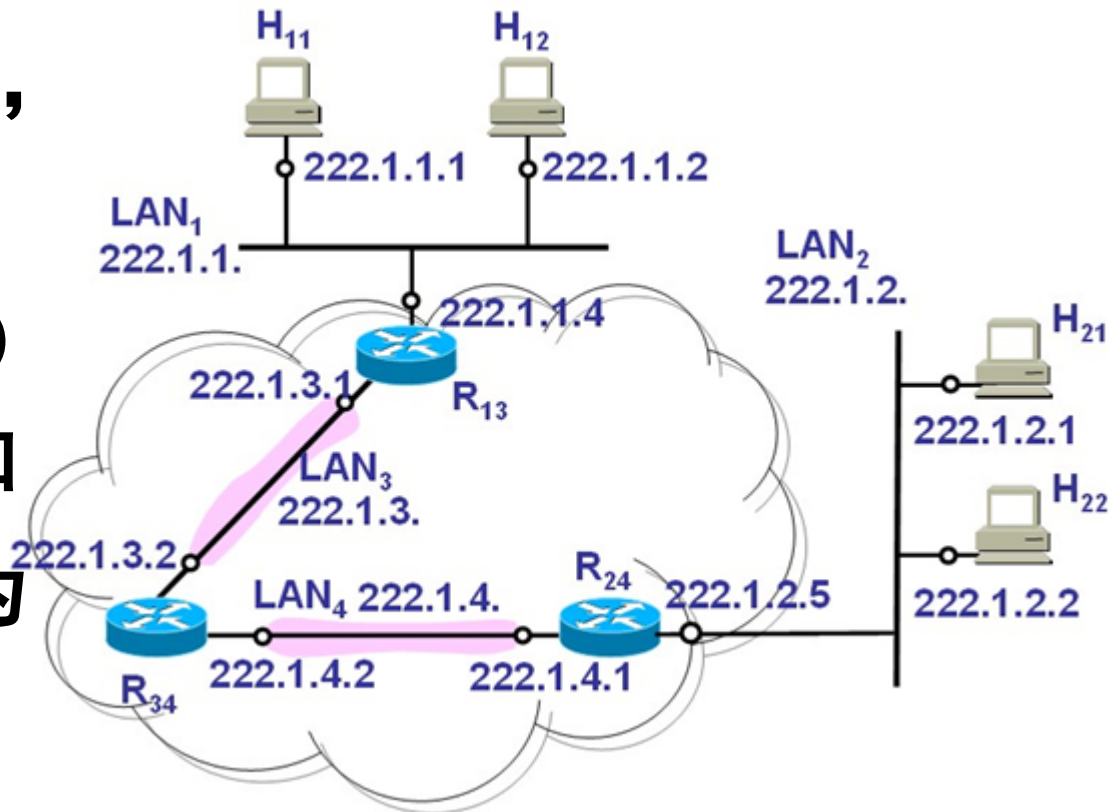
课堂练习：如图所示，四个局域网(LAN₁, LAN₂, LAN₃和LAN₄)通过路由器R₁₃, R₂₄和R₃₄互联。子网掩码为255.255.255.0



(2)请完成路由器R₃₄的路由表配置

目的网络	子网掩码	下一跳地址

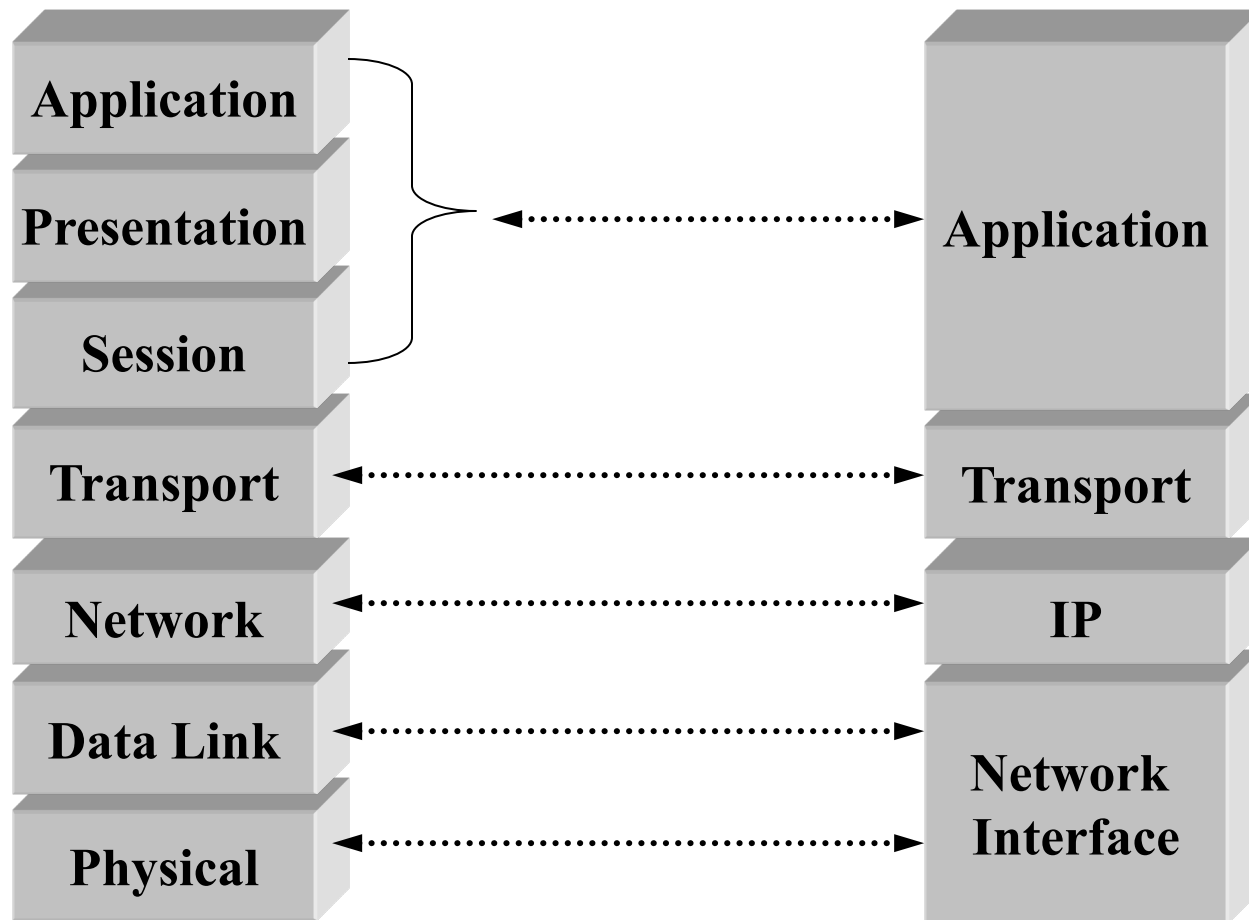
课堂练习：如图所示，四个局域网(LAN₁, LAN₂, LAN₃和LAN₄)通过路由器R₁₃, R₂₄和R₃₄互联。子网掩码为255.255.255.0



(2)请完成路由器R₃₄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）

应用层
表示层
会话层
传输层
网络层
数据链路层
物理层

OSI 7层模型

应用层
传输层
互联网层
网络接口层

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，而非真正意思上的分层
- 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