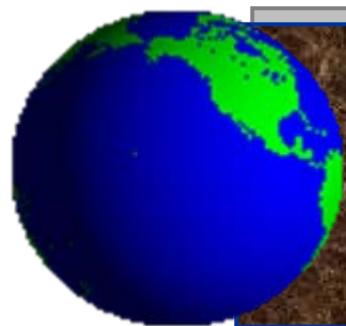


21世纪上半叶信息科学技术 的发展态势和我们的战略取向



李国杰
中国科学院计算技术研究所
2010.07.08

报告目录

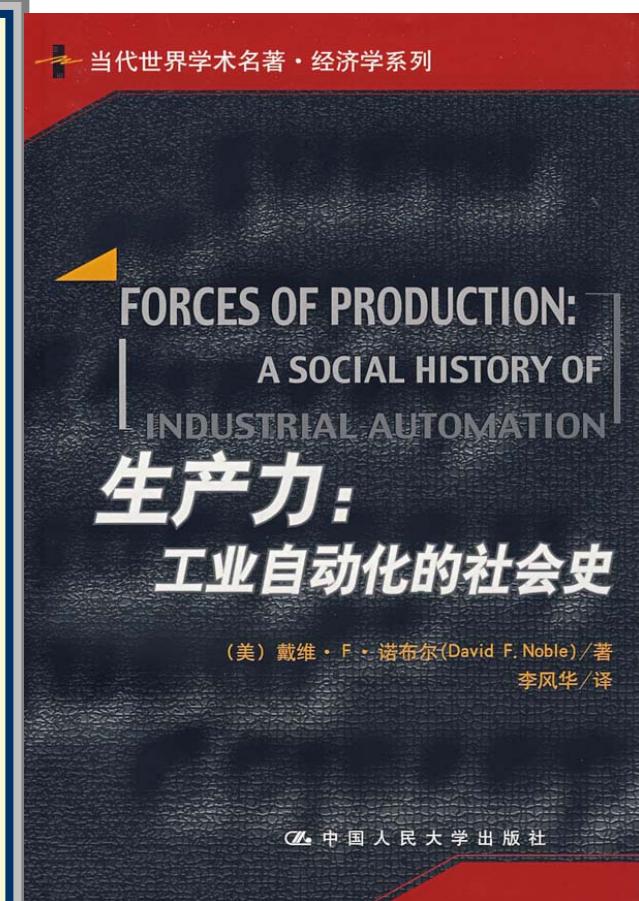
- 全面走向信息社会的国家战略取向
- 对信息科学技术认识的转变
- 信息科学技术面临重大突破
- 主要信息科学技术的发展趋势

全面走向信息社会的国家战略取向

从更全面的角度认识技术变革

- 当代世界学术名著 · 经济学系列
戴维·诺布尔：《生产力：工业自动化的社会史》，
中国人民大学出版社，2007年

- 劳动资料不仅是人类劳动力发展的测量器，而且是劳动借以进行的**社会关系**的指示器。
——卡尔·马克思：《马克思恩格斯全集》23卷204页
- 技术仅仅是一种**社会变量**，可以根据我们的选择而做出改变。鉴于技术具有政治性，我们还必须看到，在现存的政治结构下以及可预见的未来，技术仍然将构成**权力与控制的扩展**。
- 获得技术的真正成就的唯一有效方式就是**变更整个体系的技术基础**。这是人的问题，而不是技术问题。只有人才能解决它。这无疑是一个巨大的挑战，它要求我们从根本上反思科技的形式与作用，反思建构更为民主、更为平等、更为人道、更具有创造性的和谐社会的现实途径。



新技术扩散不是自发的市场行为 而是取决于人们的战略取向

- 创造美国制造体系的主要动机并不是经济的，而是军事的；这种新型制造方法的主要推动者并不是自我调节的市场而是站在市场之外的美国陆军军械部。
- 存在许多影响这种新技术扩散的因素，其中大部分都不是依靠自发的市场力量所能解释的。这些因素通常不能用所谓的理性经济行为来解释。
- 因为技术发展过程本质上是一种社会过程，而这种社会过程很大程度上隐含着不确定性和自由。技术并非必要条件。它仅仅存在于人们从中做出选择的可能范围之内。
- 技术并非症结所在，也不是解决之道。真正的问题是政治的、道德的与文化的，解决之道也是如此。

信息社会的高级阶段—U社会

- 信息社会的发展可粗略分为e社会和u社会两个阶段 目标：2020年以前可称为e社会，2050年的目标是U社会。u社会是信息社会的高级阶段。
- U有三种含义，
 - Universal, 全民普及、惠及全民；
 - User-Oriented , User-Centric, 面向用户和以用户为中心；
 - Ubiquitous, 网络通信和服务无处不在。
- U社会人类世界、信息世界（Cyber Space）和物理世界高度融合的三元协同世界，信息技术已经融入人类社会和物理世界，处处都是信息技术的应用，不再存在所谓信息技术的killer application。

对未来信息社会的期望

- 信息成为最重要的社会战略资源，信息处理成为创造社会财富的基础，提供知识和信息服务成为社会**主导行业**。
- 信息技术成为影响生产效率和生产过程的**关键因素**，信息化、网络化成为社会的**主要特征**。
- 不同于农业社会的个性无序和工业社会强制有序，信息社会的特点是协同自序。工业社会把人和自然、人和人对立起来，对资源进行掠夺性开发，而信息社会强调通过信息的协调作用，使每个社会单元找到相对优化的生存空间，通过信息的自组织作用实现社会的**协同自序**。
- 几乎人人都有信息终端，几乎所有需要联网的设备都是信息终端，绝大多数人会用电脑。

人们对未来信息社会的期望

- 网络通信无所不在并有可靠的服务保证，通信成本极低，信息处理能力几乎不受限制，信息系统可信放心；
- 使用成千上万种高效、可信、省电的信息功用设备，用户可像切换电视频道那样自由切换厂商。信息消费者与生产者高度融合；
- 机器善解人意，人机交互十分和谐。电脑网络能不断自我进化，出现社会智能的涌现现象。
- 信息技术将成为一种简洁、宁静、和谐的技术，成为像今天用电一样的“不可见技术”。
- 数字鸿沟已基本消除，每个公民都有足够的信息资源保障。
- 开放标准占主导地位，知识产权和专利保护不再是创新的障碍；政府的监管和个人自由十分和谐，个人隐私得到高度保护。

普惠泛在的信息网络体系 (U-INS)

国家与社会信息网络安全体系

传统密码与量子密码信息安全基础技术体系

以监控、测评为基础的信息安全保障与服务体系

网络应用与产业

低成本、低功耗的信息化

传统产业的数字化、网络化、智能化

无所不在的移动网、物联网应用

网络与信息产业

安全可信、个性化的网络服务技术

支撑各种网络应用和服务的基础软件与中间件

和谐普适的人机界面

连接信息世界与物理世界的CPS

面向大众、普及全民的网络系统

下一代网络
未来的后IP网络

无处不在的传感网络

支撑网络、具有变革性的器件与系统

微电子

光电子

计算机

存储器件与系统

网络科学与新的信息科学

算法交互、可信计算理论

以计算思维为特征,以生命网络、社会网络、神经网络为研究目标的计算生物学、社会计算、脑科学

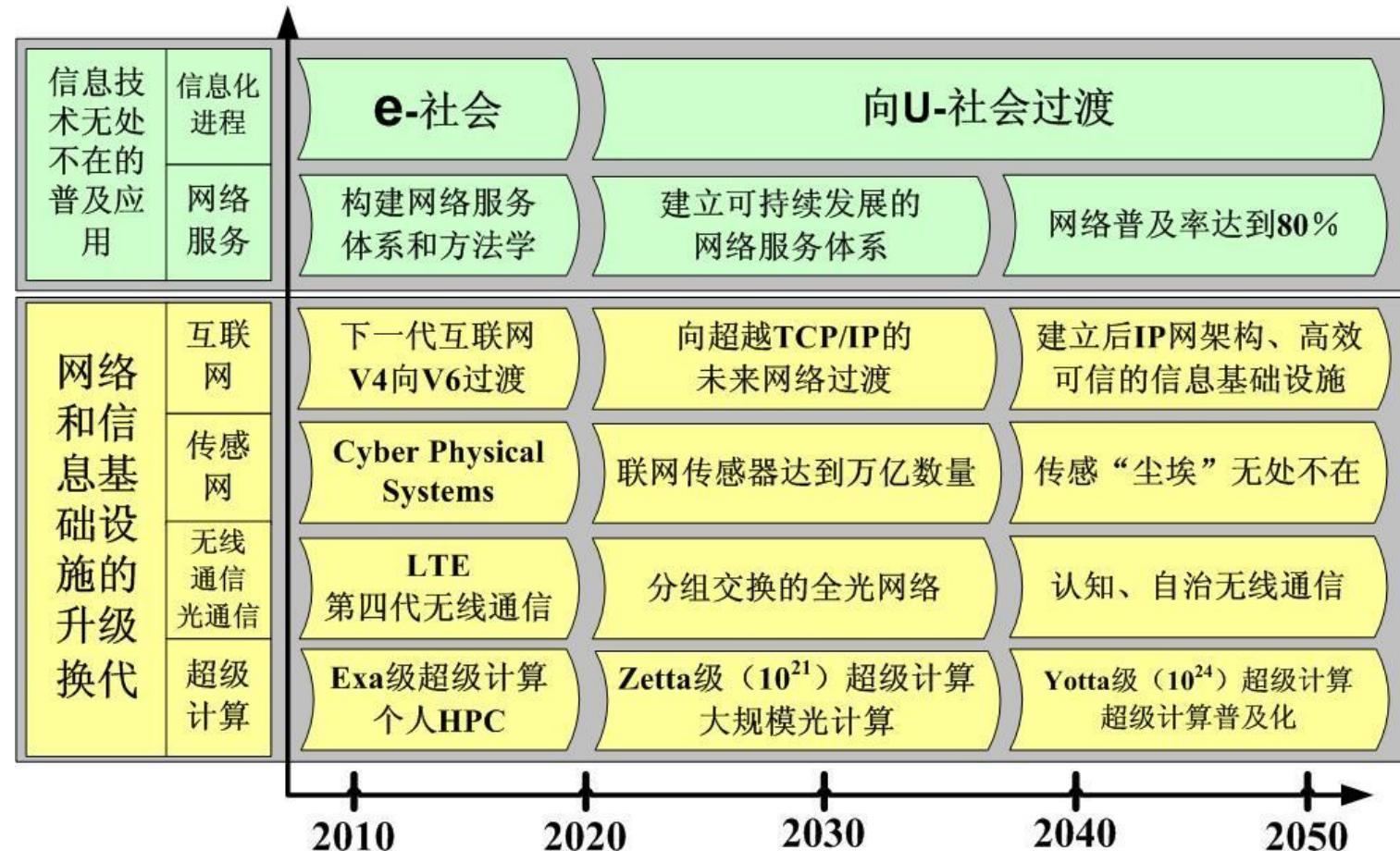
以网络信息论为基础的网络科学

这一体系体现了21世纪上半叶我国要全面进入信息社会的重大战略需求,也包含了信息领域需要重点发展的科学技术。

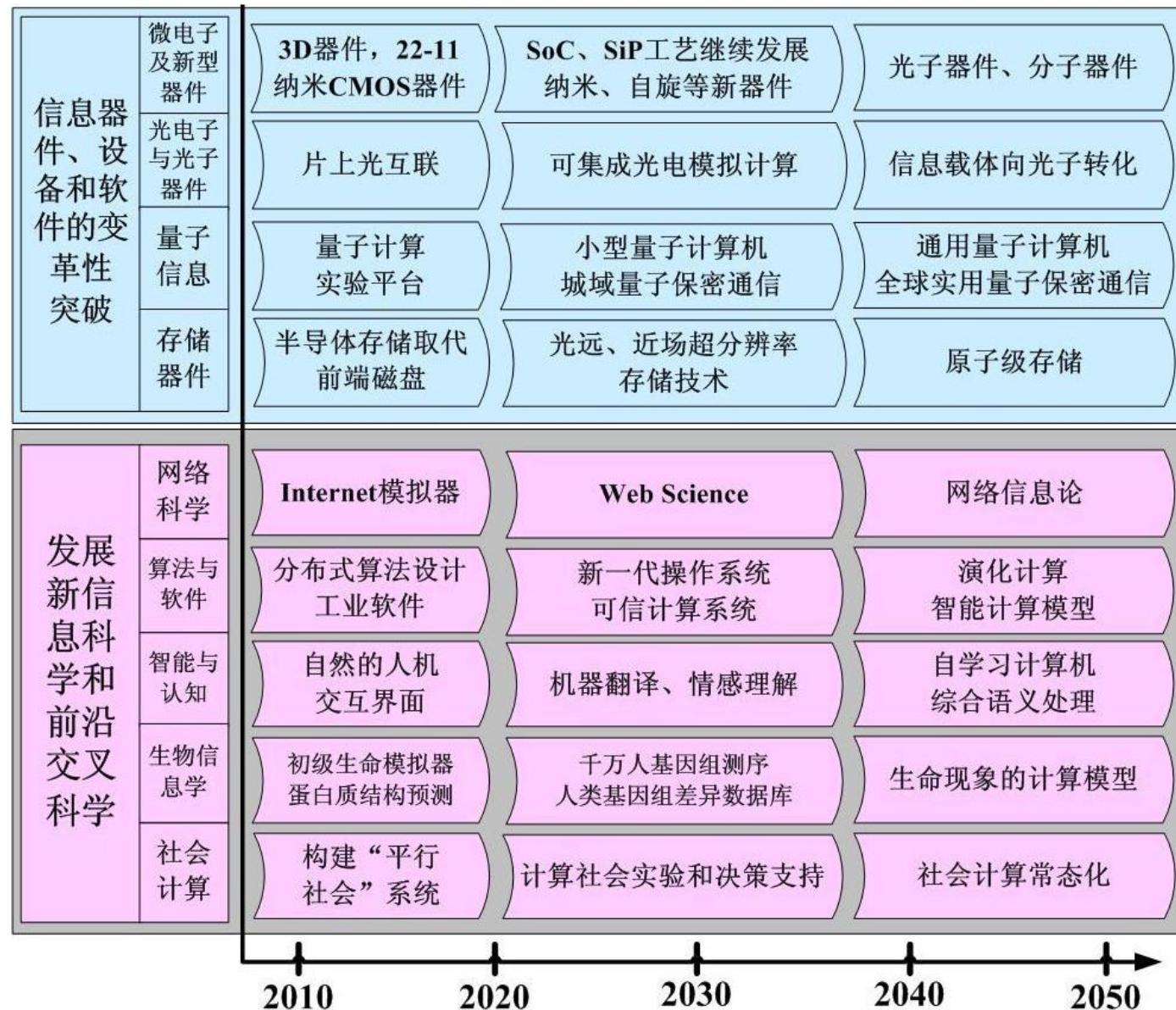
U-INS的九个目标特征

- 普惠：信息网络的用户普及率超过80%。
- 增值：中国信息市场实际增长10~20倍，12亿人信息脱贫。
- 泛在：无所不在普及全民的信息网络，信息思维渗透到各个学科。
- 低成本：基本信息服务免费，大量的信息服务十分廉价。
- 可持续：信息网络的能耗、资源消耗、排放实现零增长。
- 安全：安全和谐的人机物三元世界，文明的信息空间。
- 变革：通过科学技术非延续式的发展，达到上述目标
- 自主：从模仿者变为创新者，对外科技依存度小于20%。
- 平台：科技界发展信息科技基础平台，企业和民众创造产品和服务。

至2050年信息领域科技发展路线图

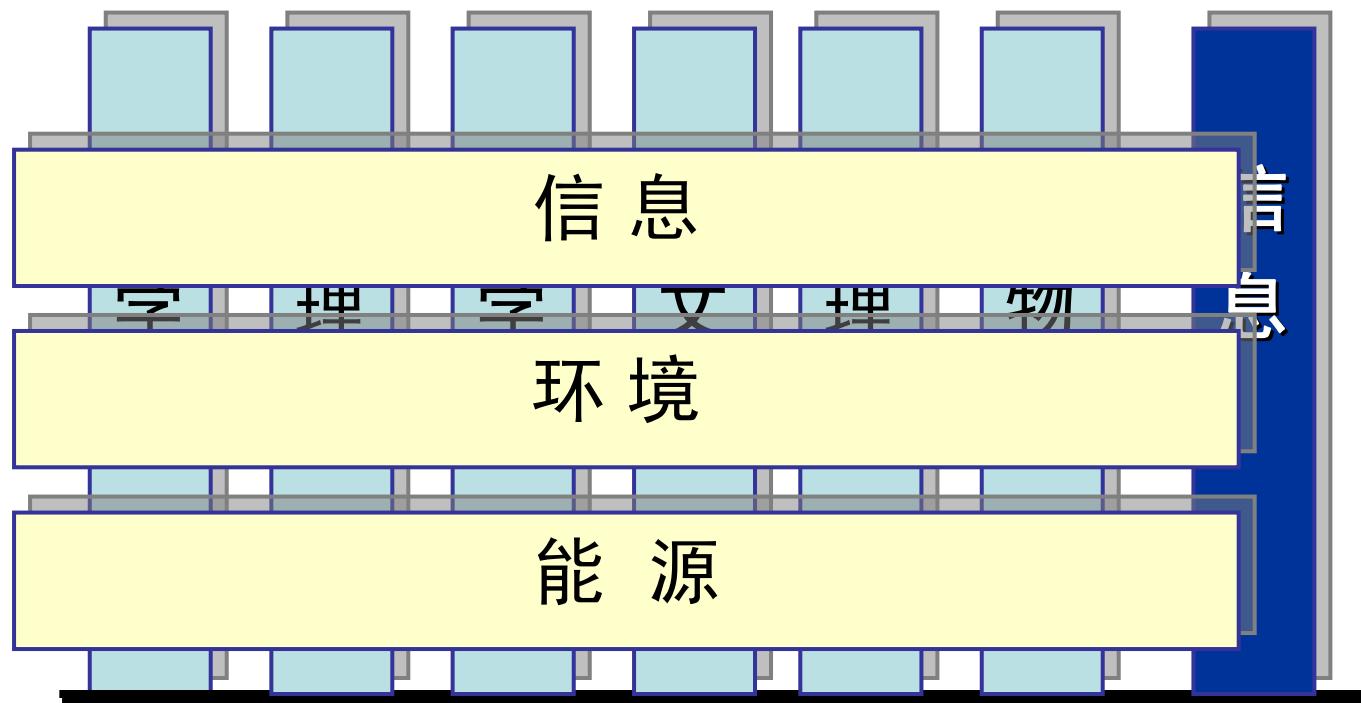


至2050年信息领域科技发展路线图

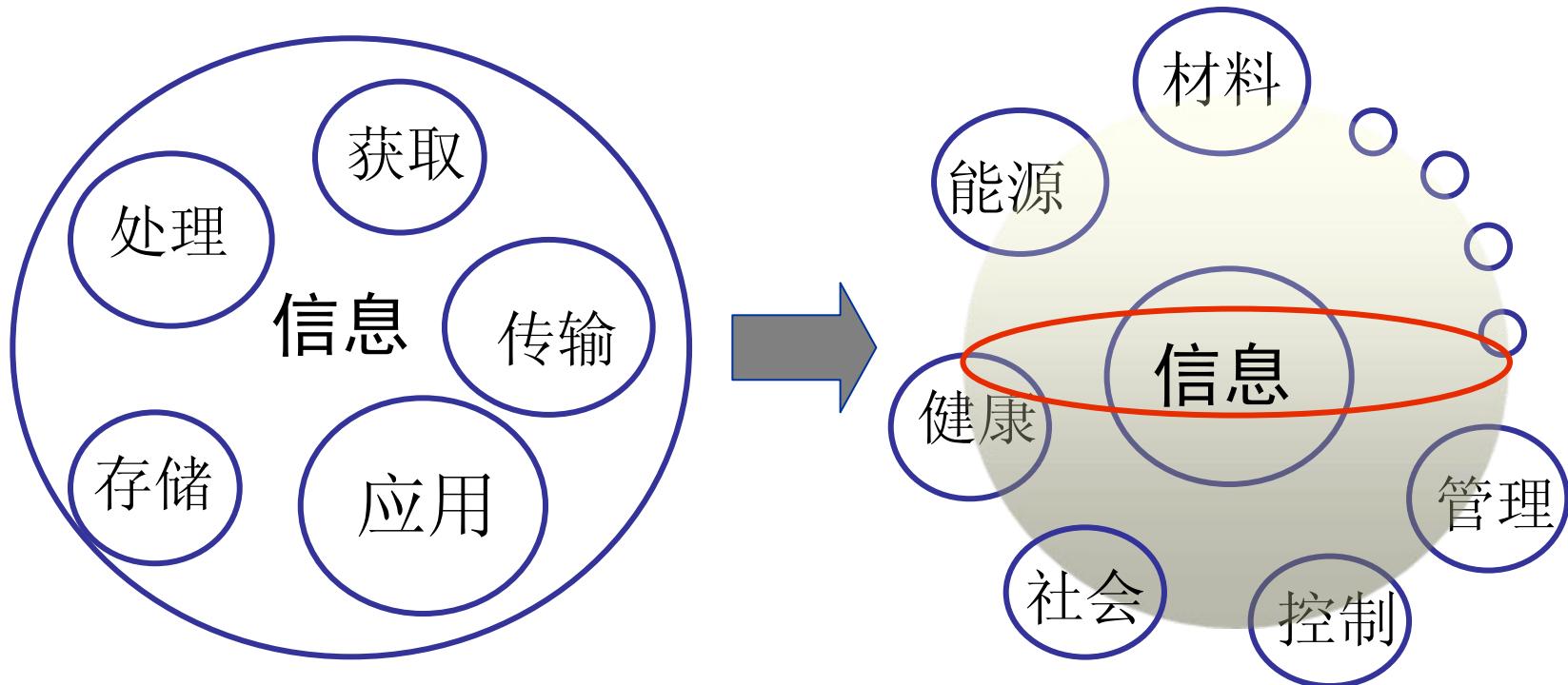


对信息科学技术认识的转变

究竟什么是信息科学技术？



从重视信息科学技术的 内涵转到重视外延



传统的信息科学技术

21世纪强调的信息科学技术

美国工程院列出的21世纪 工程科技重大挑战

- 实现低成本的太阳能利用
- 通过聚变获取能源
- 开发碳汇方法
- 管理氮循环
- 提供获取洁净水的途径
- 研制更好的医药

- 促进医疗信息科学发展
- 保障网络空间安全
- 提高虚拟现实技术
- 促进个性化学习
- 大脑逆向工程

- 制止核恐怖事件
 - 修复改善城市基础设施
- 研究科学发现的工具

几乎都是信息与
其他领域的
交叉学科

21世纪信息技术发展的新取向

- 在继续发展工程技术的规模效益的同时，更加重视信息技术的多样性、开放性和个性化，更加重视信息技术惠及大众。
- 在重视技术作为生产力决定性因素的同时，更加重视信息科学的研究探索，特别是与纳米、生命、认知等科学的交叉研究；更加重视医学及与人类健康有关的信息科学技术。
- 人们在重视信息技术的市场竞争能力及经济效益的同时，将更加重视生态和环境影响，探索对有限自然资源和无限知识资源的分享、共享和可持续利用。
- 在继续科学与技术的紧密结合的同时，更加重视信息技术与人文艺术的结合，更加重视信息技术伦理道德方面的研究和对信息技术社会作用的法制化管理与监督。

改变“狭义工具论”的旧观念

- 长期以来，计算机和信息网络被社会看成是一种高科技工具，计算机科学技术这门学科也被构造成一门专业性很强的工具学科。
- 这种社会认知很容易导致负面的“**狭义工具论**”，即认为信息科技只是一种高科技工具，“高科技”意味着认知门槛高、成本高，“工具”意味着它是一种辅助性学科，并不是能够满足国家经济社会发展、满足人民经济文化需求的主业。
- 这种狭隘的认知是信息科技向各行各业渗透的最大障碍，对信息科技的全民普及极其有害。需要实现从“**Ware**”到”**Value**”的转变（与医学相比较）。
- 需要在全社会传播和普及“**计算思维**”（**Computational Thinking**）

计算思维---普适的思维

- 计算思维是运用计算机科学的基础概念去求解决问题、设计系统和理解人类的行为，通过约简、嵌入、转化和仿真等方法，**把一个看来困难的问题重新阐释成一个我们知道怎样解决的问题。**
- 计算生物学正在改变着生物学家的思考方式；计算博弈理论正改变着经济学家的思考方式；纳米计算改变着化学家的思考方式；量子计算改变着物理学家的思考方式。
- **计算思维**
 - 是概念化思维，不是程序化思维；
 - 是基础的技能，不是机械的技能；
 - 是人的思维，不是计算机的思维；
 - 是数学和工程融合的思维，不是数学性思维；
 - 是面向所有人的思维，不仅仅是计算机科学家的思维。
 - ——引自美国NSF副主任周以真教授的CACM文章

The Power of the Computational Perspective

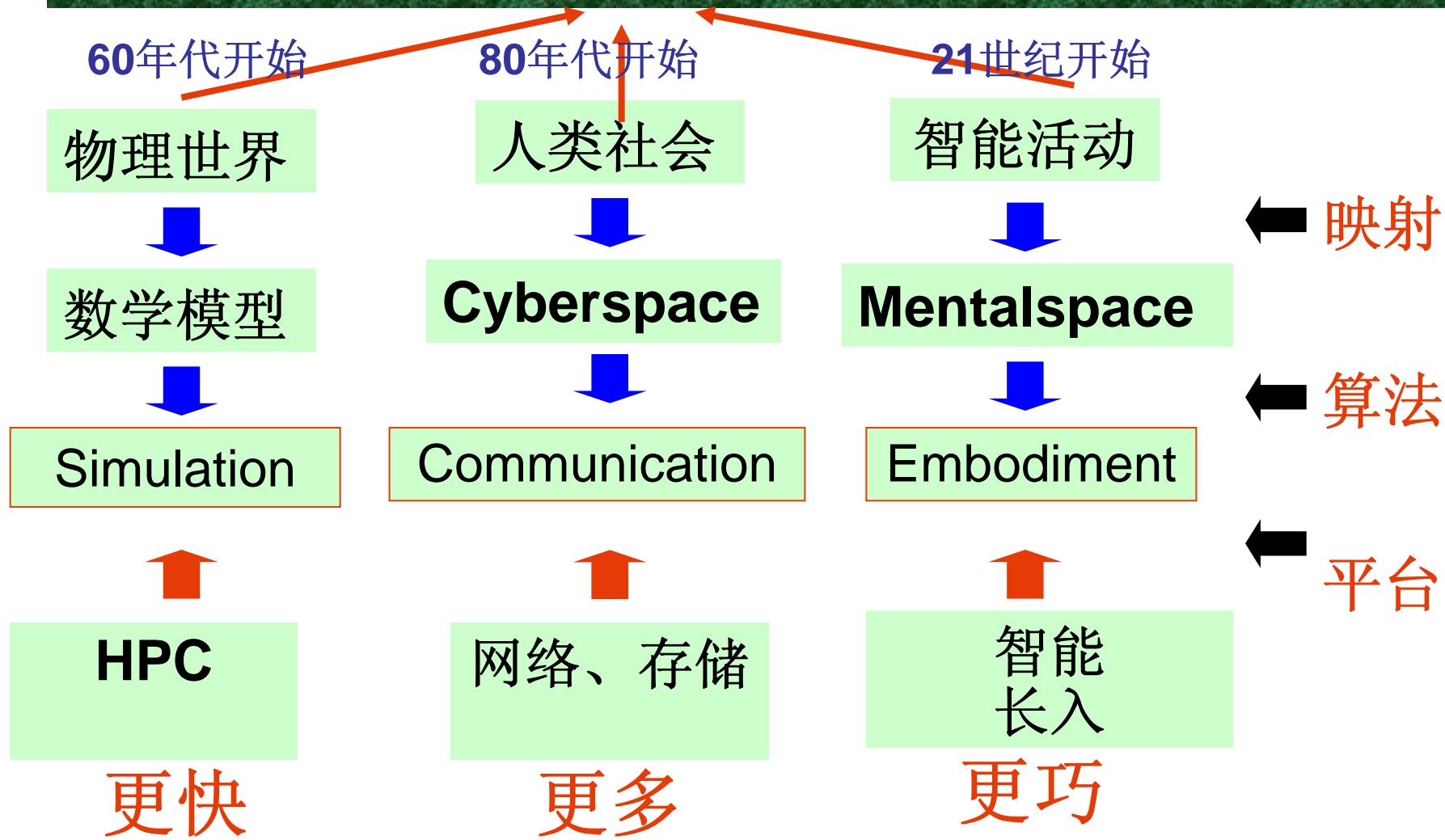
- The algorithmic worldview is changing the sciences: mathematical, natural, life, social.
- CS is placing itself at the center of scientific discourse and exchange of ideas.
- And this is only the beginning ...

----Richard M. Karp

图灵奖获得者

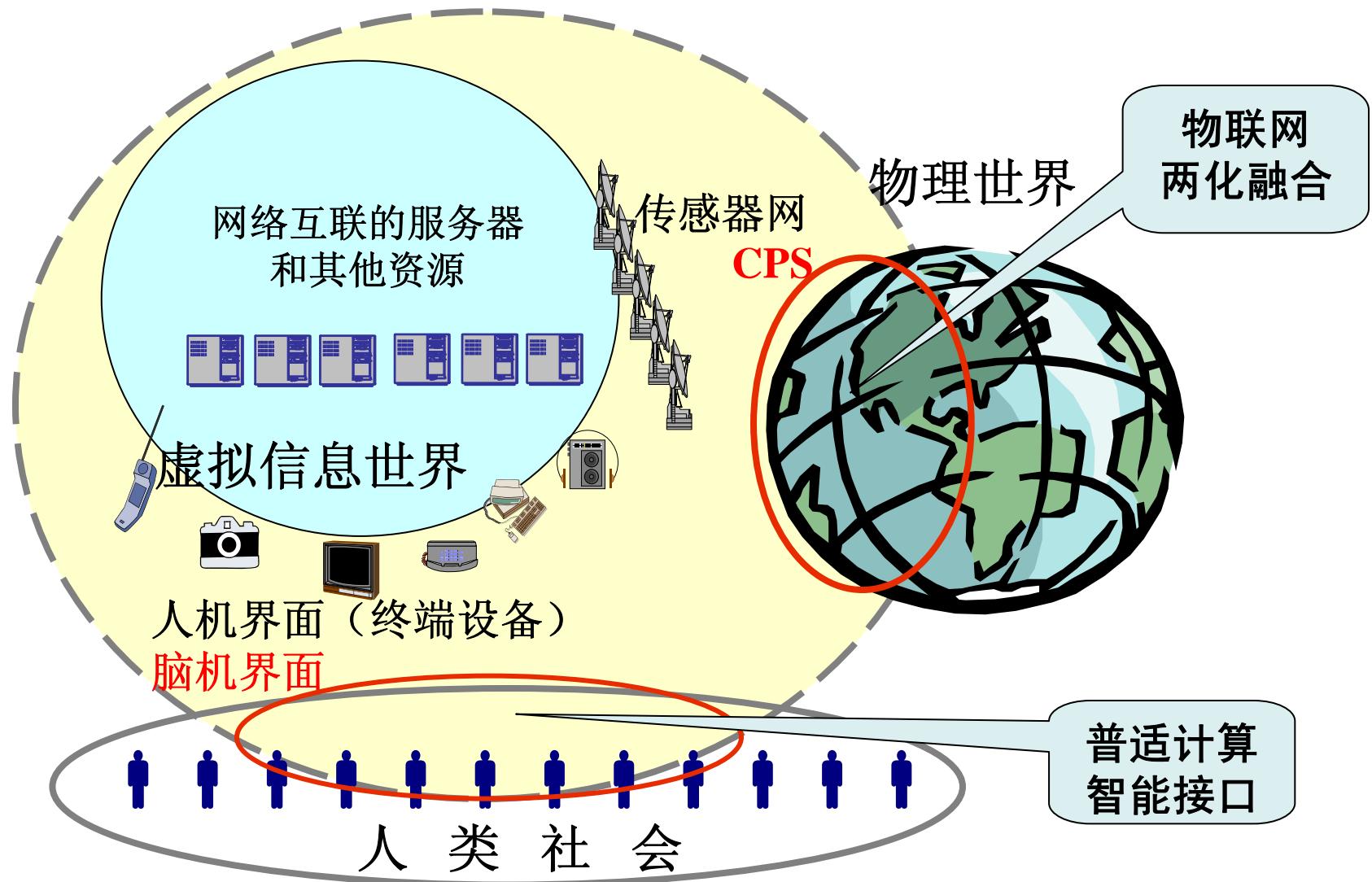
中科院爱因斯坦讲座教授

“一切皆可计算” Computing Thinking

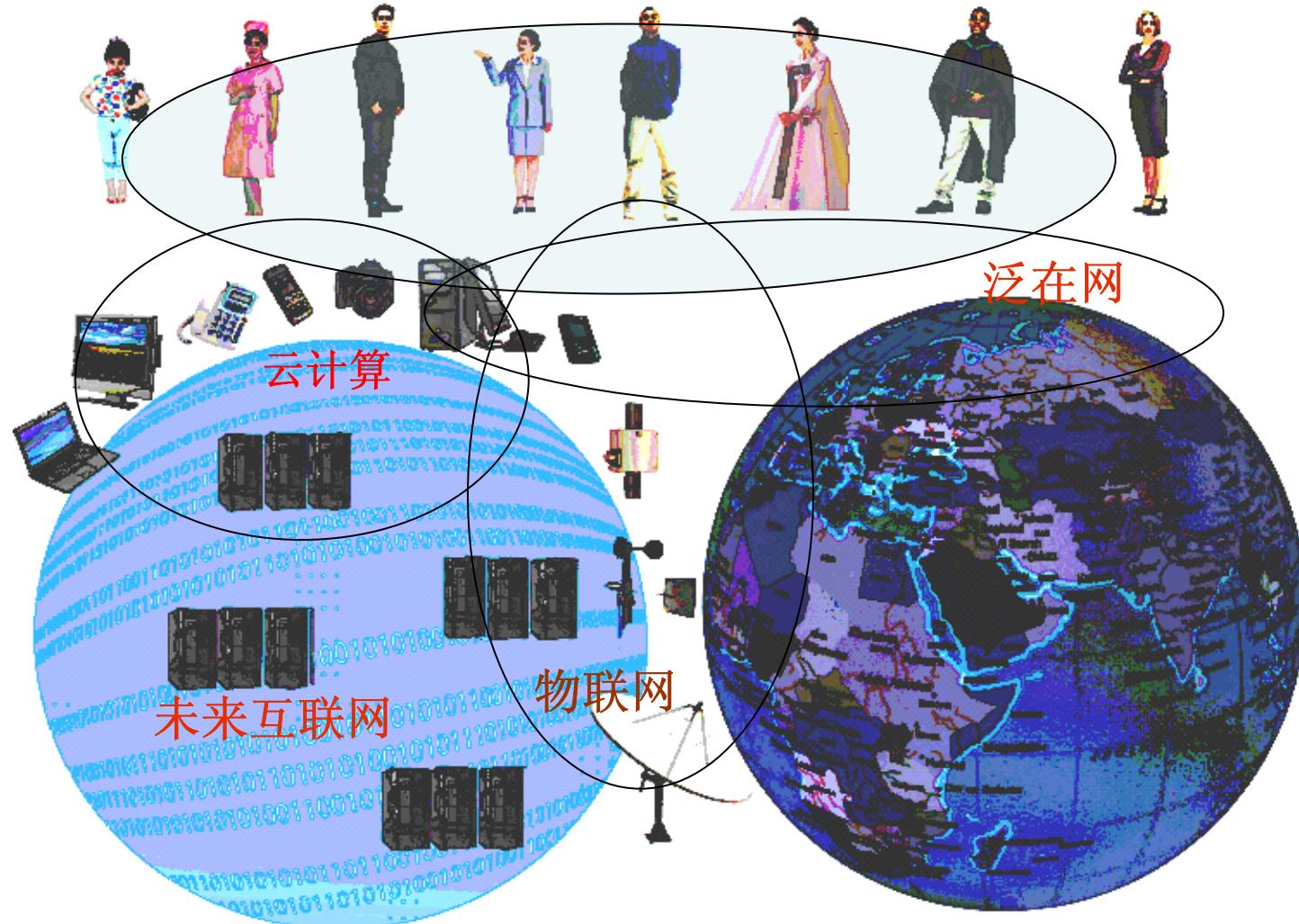


—此图思想来自图灵奖得主Butler Lampson的报告

物理世界、信息世界、人类社会 组成三元世界—新信息世界观



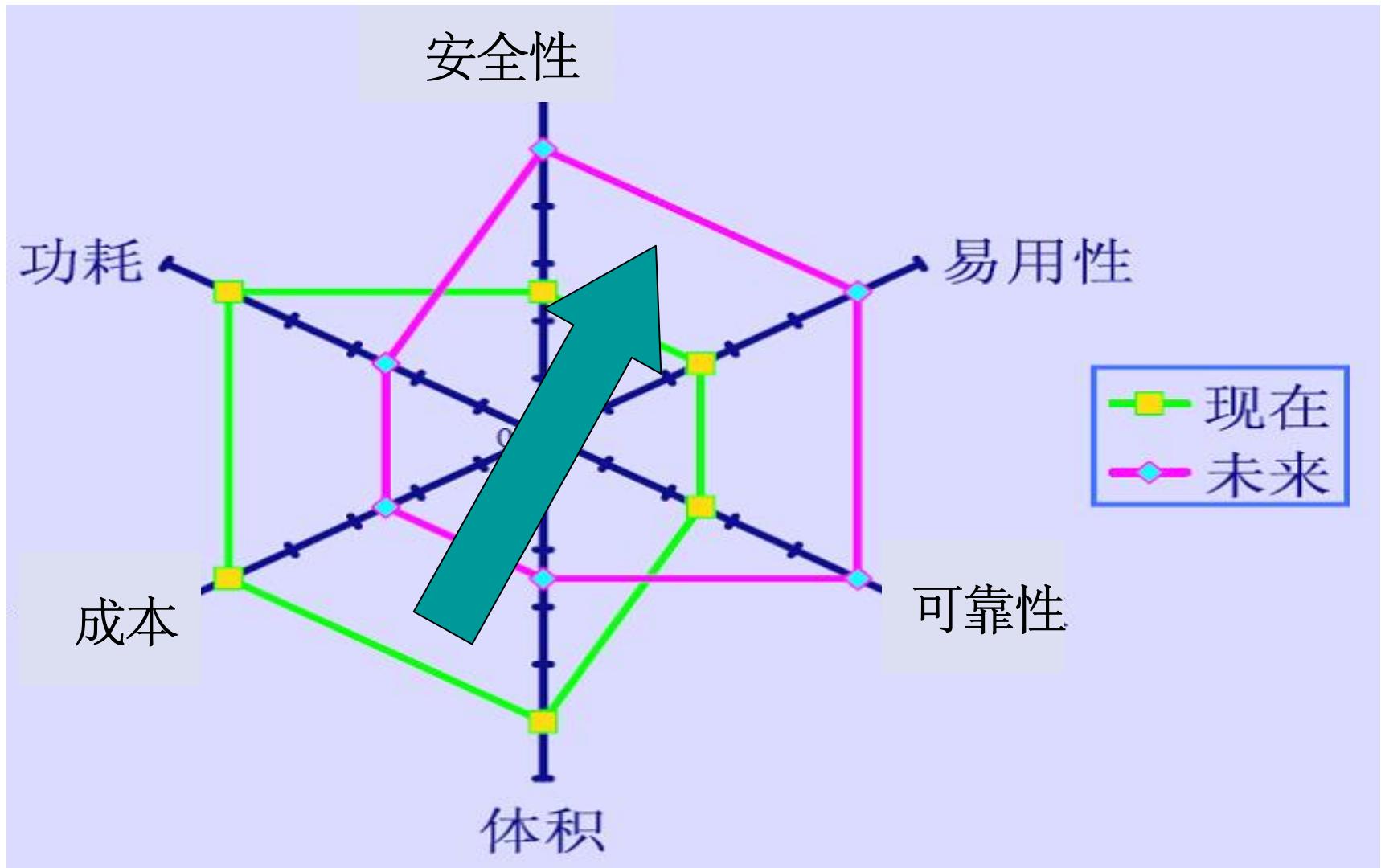
人机物高度融合的三元协同世界



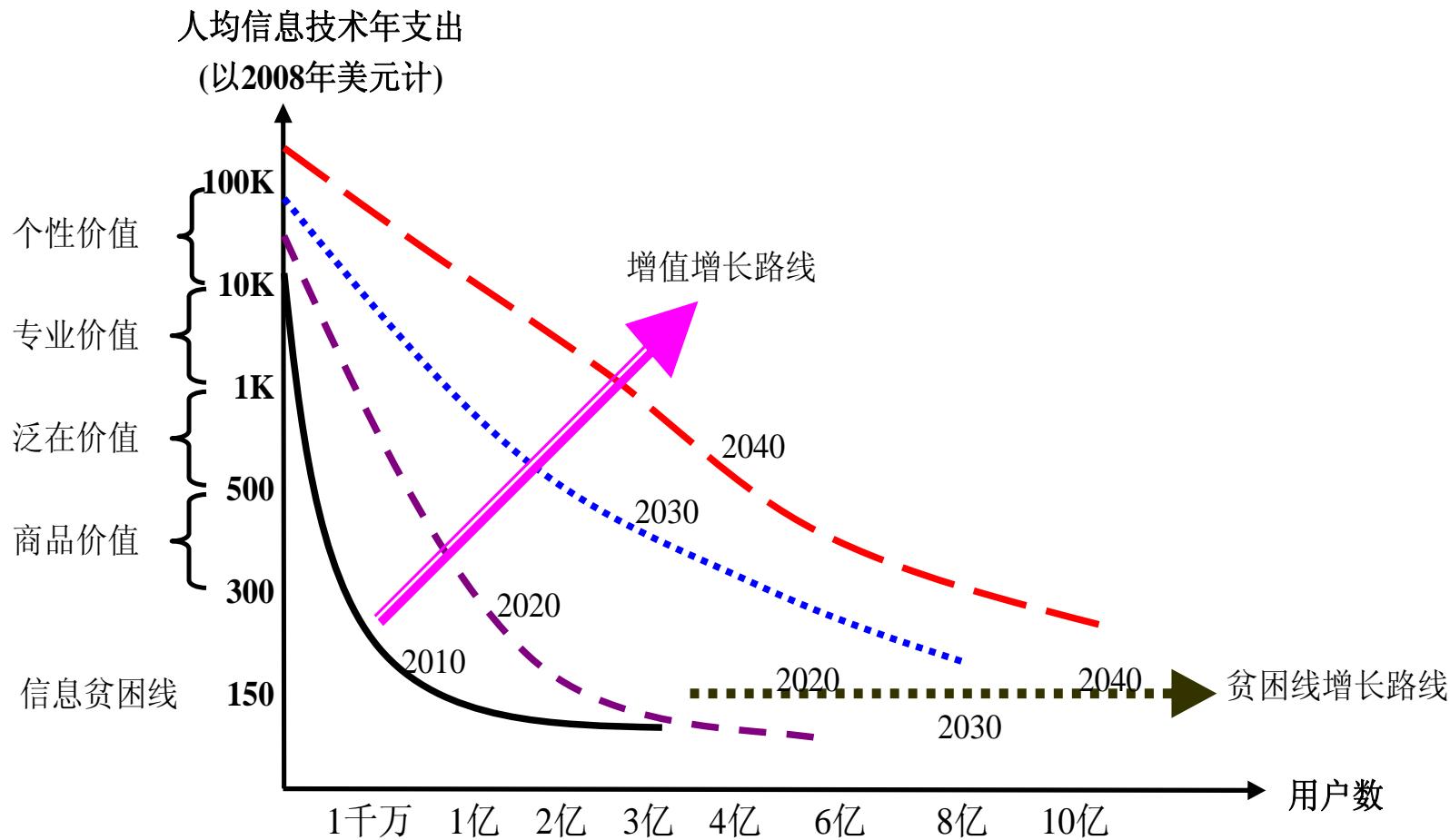
从人机共生模式转向人机物三元社会模式

- 今天使用的信息系统，在很大程度上仍然根基于40多年前提出的人机共生思想：人做直觉的（说不清的）、无意识的事，计算机做有意识的、确定的、机械性的操作。人确定目标和动机，计算机处理琐碎细节，执行预定流程。
- 今天的计算机世界已经与一人一机组成了、分工明确的人机共生系统不同。人机物三元世界是一个多人、多机、多物组成的动态开放的网络社会。
- 这个跃变促使信息科学发生本质性的变化。信息科学应当成为研究人机物社会中的信息处理过程。我们需要回答下述基本问题：万维网能被看成一台计算机系统吗？什么是万维网的可计算性？什么是物联网计算机的指令集？人机物社会中的“计算”如何定义？它还是图灵计算吗？
- 为了研究人机物三元世界的计算问题，传统算法科学的集中式假设、确定起始假设、机械执行假设、精确结果假设等可能都需要突破。

改变信息技术的研究方向



转变到价值与普及同步增长的发展模式



中国信息市场（即IT支出）的预测

预测	人均GDP	IT市场 (十亿 美元)	IT市场占 GDP比例	IT市场 年均 增长率	IT用户数 (百万人)	用户人均 IT年支出	人口人均 IT年支出
美国 2000	\$34, 600	400	4. 10%	—	161	\$2, 484	\$1, 418
中国 2000	\$854	26	2. 40%	25. 0%	22. 5	\$1, 154	\$21
中国 2008	\$3, 300	110	2. 55%	12. 7%	270	\$415	\$85
中国 2040	\$14, 000	1100	5. 14%	7. 33%	1, 200	\$900	\$727

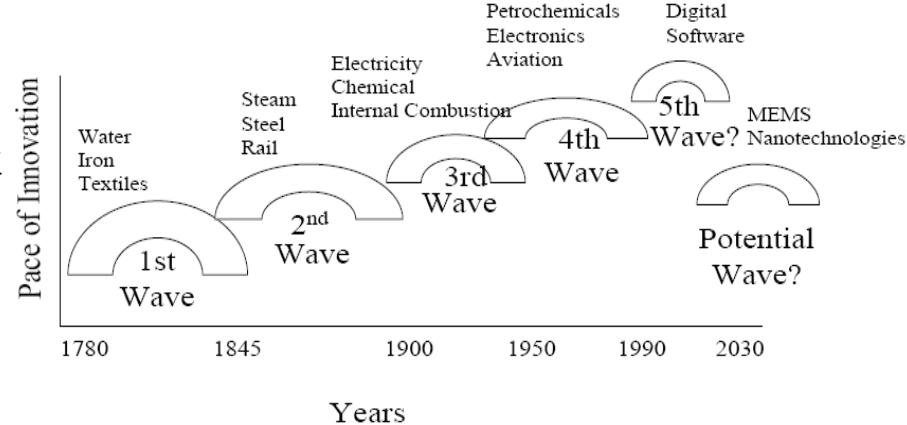
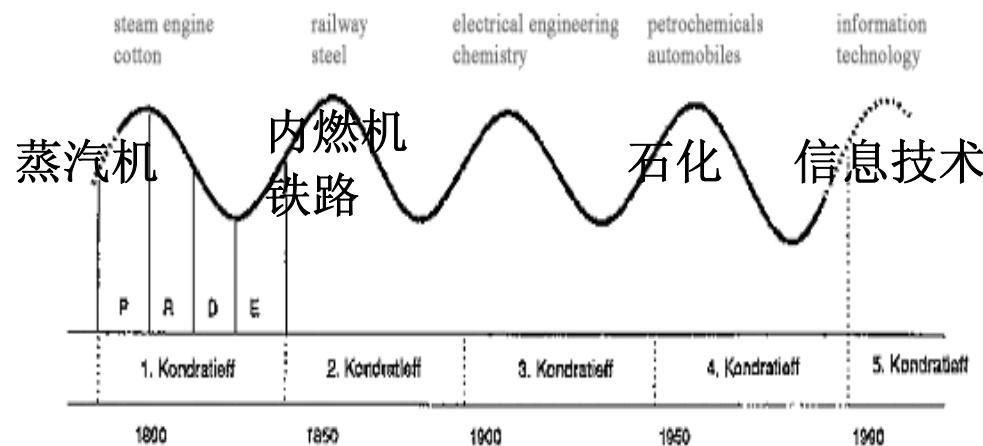
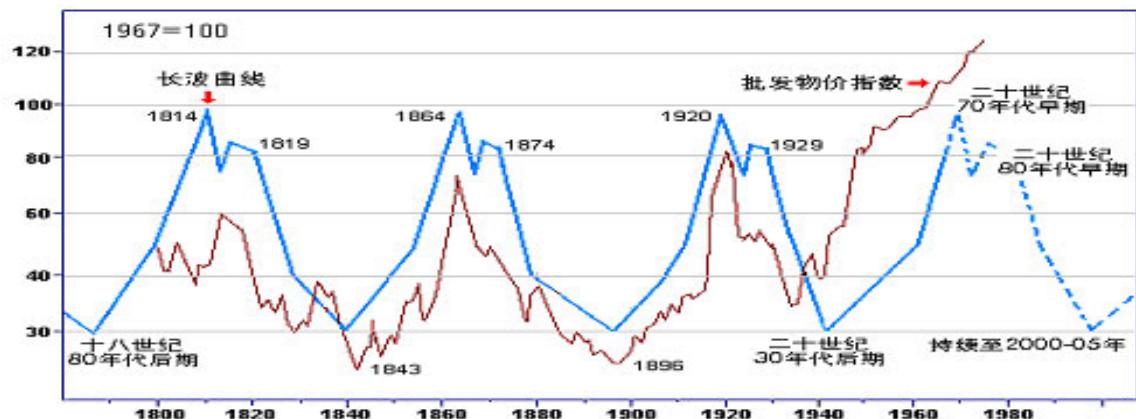
- 衡量一个国家信息化水平的一个指标是其信息市场规模。国际上习惯从消费角度给出信息技术支出 (IT or ICT **expenditure**) 的信息市场统计数据，含计算机硬件、网络、软件和服务(通信)支出。
- 数据来源于国家统计局、工业和信息化部、CNNIC、ITU、《中国现代化报告2006》等。2040年数据是2008年价格；中国数据按汇率统计。

改变图灵计算模型不可突破的观念

- 目前的主流计算机科学教科书认为：图灵机不能做的事情将来的计算机也不能做。
- 图灵计算被看作是从输入到输出的函数，不终止的计算被认为是没有意义的。
- 在网络环境中，计算主体（进程）在与外界不断交互的过程中完成所指定的计算任务。对于这类交互式的并发计算，传统的基于‘函数’的计算理论不再适用。
- 如何为实际并发系统的设计与分析提供坚实的理论基础，在今后几十年内是计算机科学面临的重大挑战。
- 算法研究的重点应从单个算法的设计分析转向多个算法的交互与协同。

信息科学技术面临重大突破

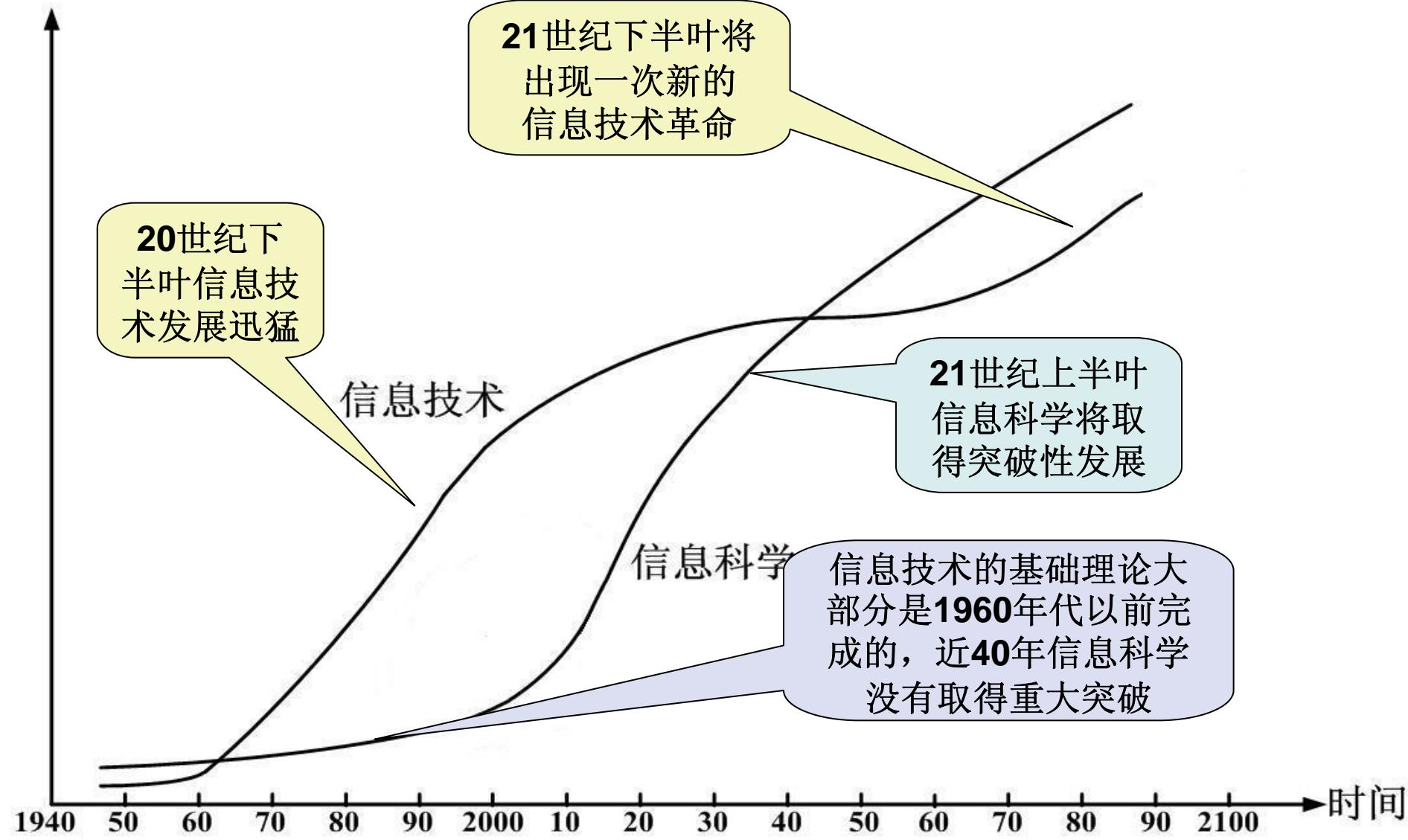
康德拉季耶夫经济长波理论



以信息技术为特征的经济发展长波已进入**后半期**，未来10-15年信息科学技术面临革命性的突破。

20-21世纪信息科学与技术发展态势示意图

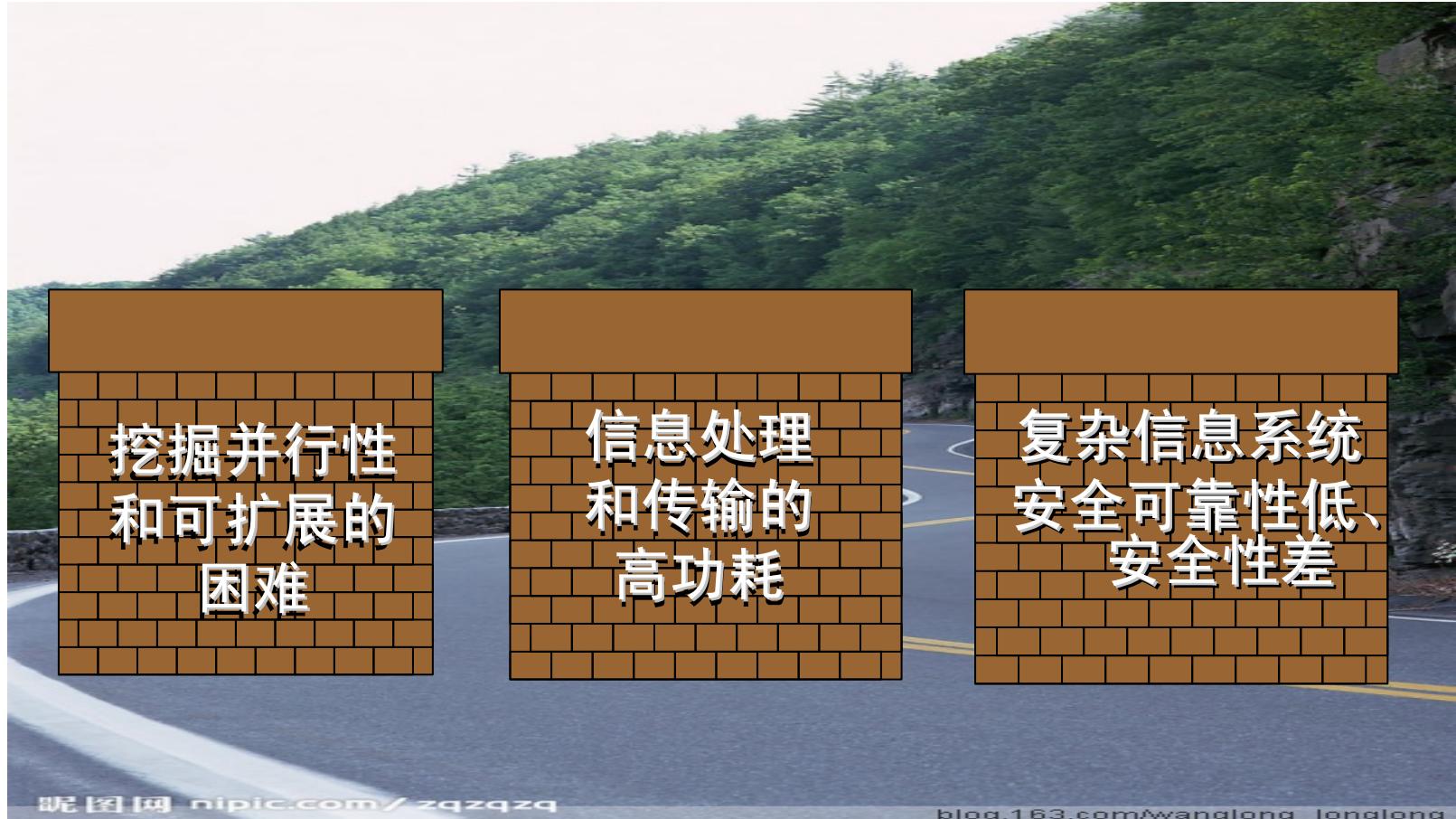
发展程度



科学院2050年路线图 对信息技术的基本判断

- 信息技术不会像机械和电力技术一样，经过半个世纪的高速发展以后，就变成以增量改进为主的传统产业技术，在21世纪上半叶让位于生物技术和纳米技术，而是**面临一次新的信息科学革命；在整个21世纪**，信息科学与技术将与生物、纳米、认知等科学技术交织在一起，**继续焕发出蓬勃的生机**，引领和支撑国民经济的发展，改变人们的生活方式。
- 不论是集成电路、高性能计算机，还是互联网和存储器，**2020年前后都会遇到只靠延续现有技术难以逾越的障碍（信息技术墙）**，孕育着新的重大科学问题的发现和原理性的突破。
- 预计今后20-30 年是信息科学技术的变革突破期，21世纪上半叶将兴起一场以**高性能计算和仿真、网络科学、智能科学、计算思维**为特征的信息科学革命，信息科学的突破可能导致21世纪下半叶一场新的信息技术革命。

当前信息技术面临三座高墙



信息领域的技术突破重点方向

可扩展到亿级并行度
惠及数十亿用户

可扩展性



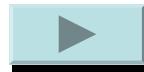
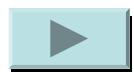
低功耗

可靠安全

低功耗的信息系统

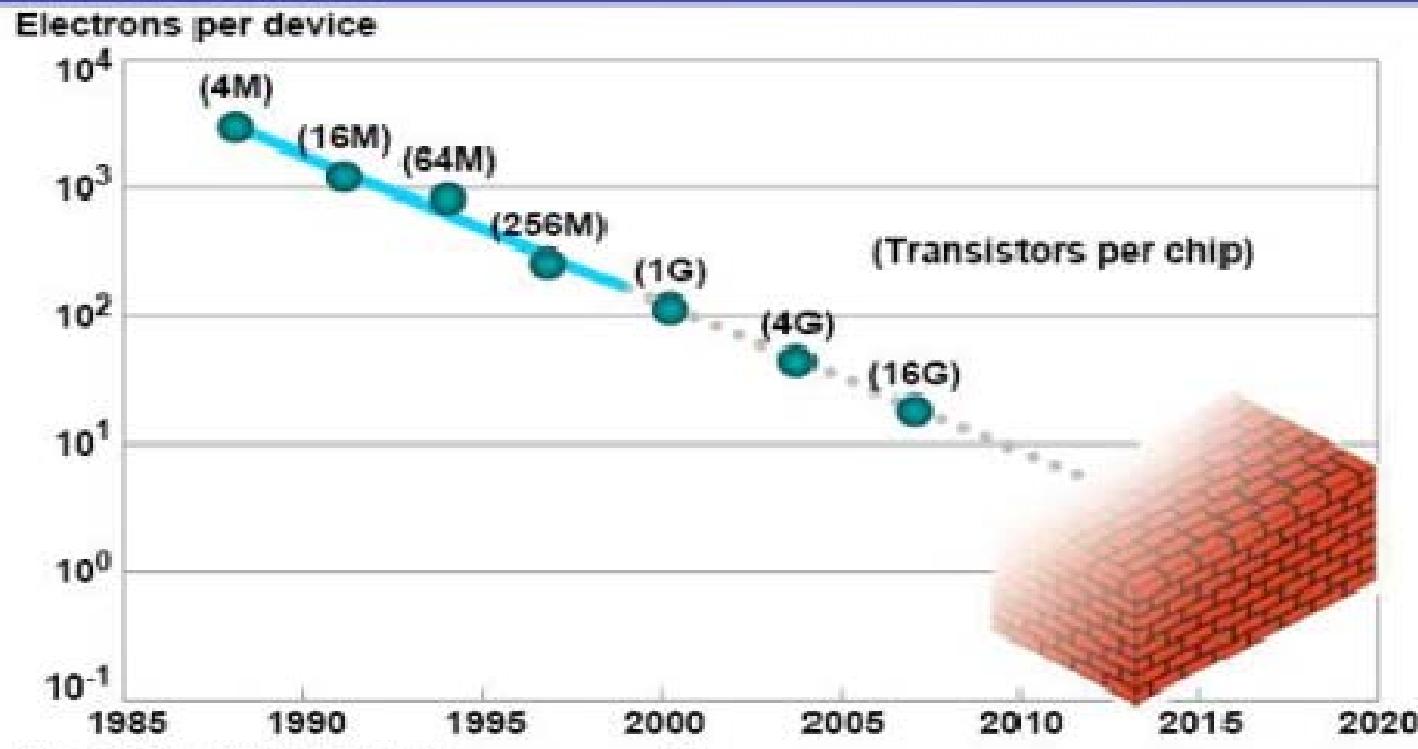
高可信的信息系统

2020—2030年之间可能出现的“技术墙”

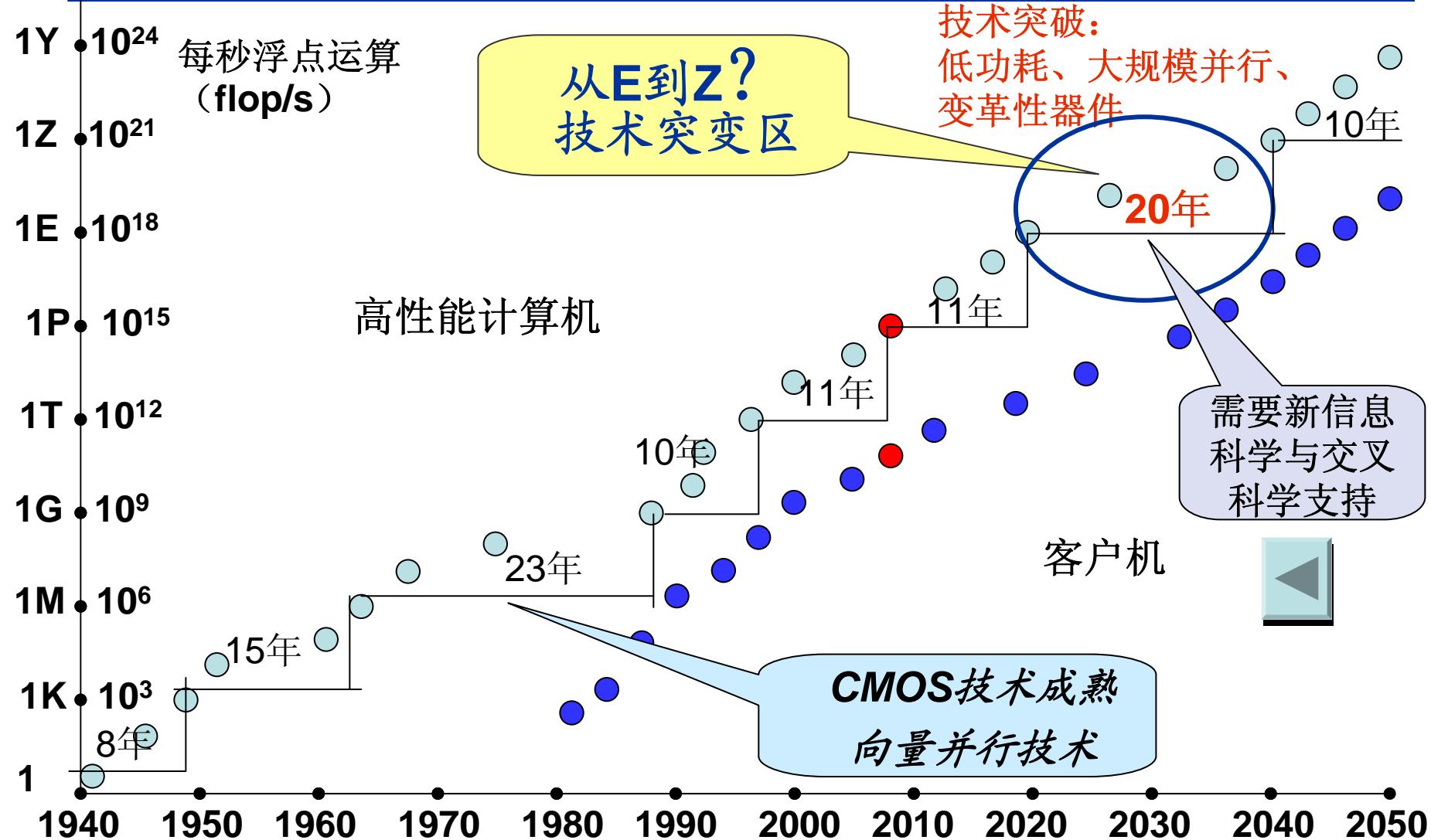
- 许多信息技术不约而同地将在2020-2030年之间出现难以逾越的障碍。
- 到2020年左右，摩尔定律将不再有效，集成电路正在逐步进入“**后摩尔时代**”，我们必须更多地从Beyond CMOS中寻找新的出路。 
- 计算机正逐步进入“**后PC时代**”，终端设备将从“**高大全**”向“**低小专**”（“专”指个性化）转变，**降低功耗**是首要目标。
- 2020年以后，超级计算机的“**千倍定律**”将失效，只在现有的技术基础上做改进，2030年肯定做不出Zettaflops级（ **10^{21} flops**）水平的计算机。 
- 进入“**后IP**”时代是不可避免的发展过程，可能需要20年时间才能真正突破TCP/IP协议的局限。 

Moore定律的2020技术墙

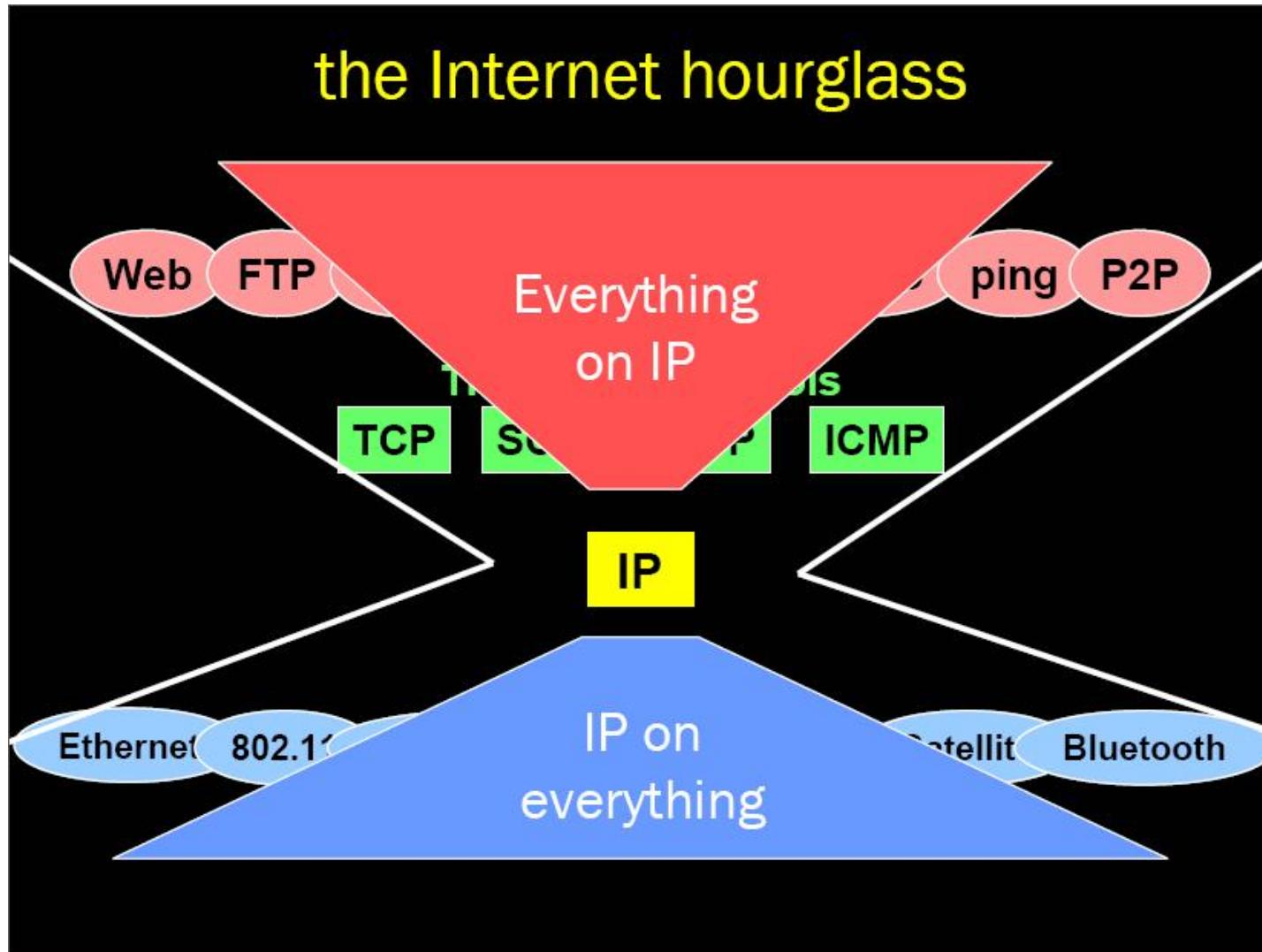
Vanishing Electrons (2016)



2020—2040年是 高性能计算的技术突变区



成也‘IP’，败也‘IP’



21世纪网络科学技术的变革

- 信息系统是像电力交通一样的基础设施，一般要求**相对稳定**，但其所依靠的信息技术是**更新换代很快**的应用技术。这就是发展信息技术的一个**根本性矛盾**。改变信息基础设施必须巧妙地把渐进的**演进**、新旧网的**重叠**和**革命性的突破**有机结合起来，这种结合需要高超的智慧和眼光。
- 从来没有人设计互联网，Internet是自己演化涌现（emerging）形成的。**未来网络一定要建立在对网络的深刻理解上**，不仅要理解网络的协议层，而且要理解网络的**动力学行为**、**可控制性**、**安全性**、**健壮性**和**演化规律**。
- 网络科学是研究人机物三元世界的网络共性规律、表达模型和计算理论的新兴学科，涉及**经济**、**社会**等和**信息科学交叉领域**所面临的科学问题。网络科学将会提出新的**网络信息理论**的概念并发展新的理论体系。

研究未来网络需要从头做起 (Clean - slate) —美国FIND计划的启示

- 网络是否要继续采用分组交换;
- 端对端原理是否要改变
 - 端对端原理的提出者Clark 教授在2009 的一次FIND工作会议上建议：将E2E 原理改为**trust-to-trust**原理，即应用的智能不一定在终端，而是放在有足够的信任能正确完成任务的设备上
- 路由和包转发是否要分开；
- 拥塞控制和资源管理问题；
- 身份认证和路由问题。

细分研究领域	资助项目数
新型体系结构	16
内容分发系统	1
路由机制	3
网络虚拟化技术	2
新型光网络	3
网络管理	4
故障诊断、生存性	3
网络感知、测量	2
安全与隐私	4
无线、移动网络与服务	6
应用管理	1

设计未来互联网不同于其他工程设计

- 不同于桥梁、计算机等人造物的设计（有具体的需求和目标），设计未来网络不是造一个有具体目标的人造物品，**实际上是设计一个环境**，能引发出我们希望出现的**网络产品与服务**。
- 新的网络设计方法论应该基于theoretically-derived architectures，即**基于能适应未预见到的未来变化的新理论**。
- 研究未来网络首要的挑战是难以确定目标，如要不要设定“**构建今后可使用50—100年的Internet**”的目标。

10-15年的战略机遇期

- 2020以前要积极探索攻克“**信息技术墙**”的核心技术，重点解决信息系统的可扩展性、低能耗、安全性和易用性等难题；2020年以后，什么技术将成为新的主流技术就会逐步明朗；**2020到2035年将是信息技术改天换地的大变革期**；2035到2050年，符合科学发展观的新的信息网络体系会逐步形成。
- 这样的结论给我们的重要的启示是，从现在开始，**历史留给我们难得的机遇期只有10-15年左右**。如果我们错过这15年，就很难在21世纪上半叶成为信息产业的强国，必将对我国的现代化进程产生十分不利的影响。

主要信息科学技术的发展趋势

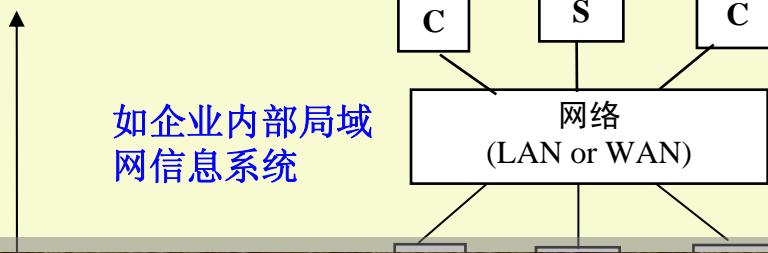
信息技术发展的宏观规律

- 半个世纪以来，信息技术呈现模拟/数字、集中/分布、通用/专用周期性交替为主的发展态势，这一规律值得我们高度重视。
 - ◆ 模拟技术 **VS** 数字技术 长周期交替（50年以上）
 - ◆ 集中系统 **VS** 分布系统 中周期交替（10-20年）
 - ◆ 通用器件（系统） **VS** 专用器件（系统） 短周期交替（10年左右）
- 掌握周期发展规律，避免路线图研究和技术决策上的片面性。

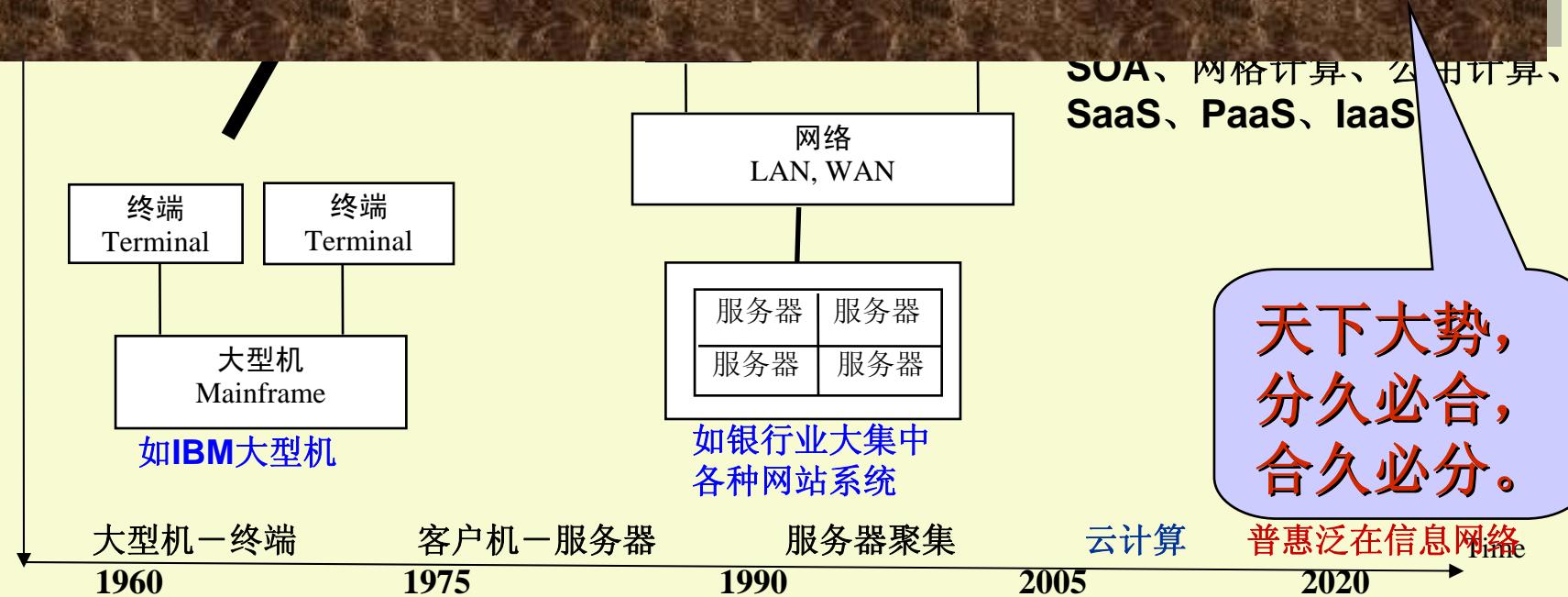
模拟技术 VS 数字技术

- 上世纪新70年代以前，信息领域的主流是模拟技术，随着集成电路的普及，数字技术开始成为主流技术。
- 人类不可能完全生活在数字世界，人接受的信号都是模拟信号，**模拟技术不是将淘汰的技术**。2007年模拟产品市场340亿美元，增长率超过数字产品。
- 模拟信号经离散化转化为数字信息以后，许多应用问题一定会遇到组合爆炸，**数字计算机能精确处理的问题只是客观世界中很小的一部分问题**（可形式化，有较低的计算复杂性）。
- 量子计算实际上是介于模拟量计算与数字量之间的一种计算方式，今后若干年，可能**模拟计算又会成为计算机科学家研究的重要方向**。

分 (Decentralize)



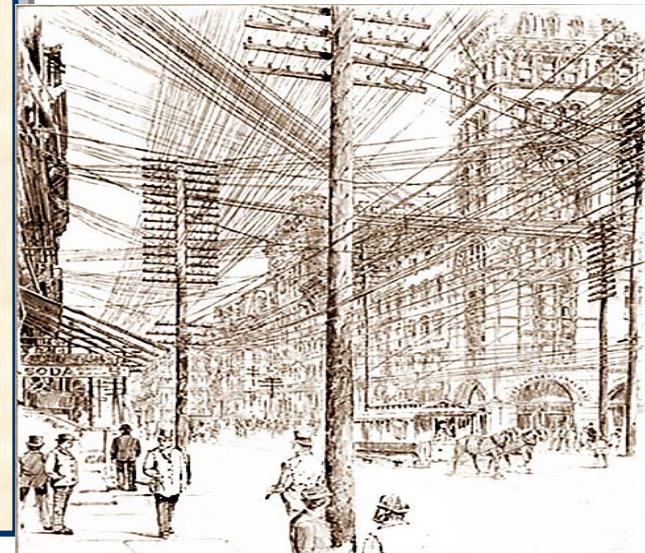
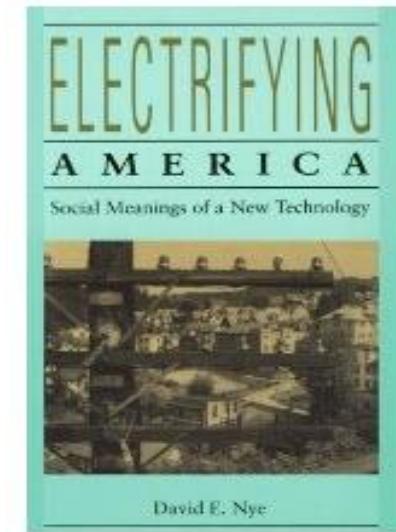
信息产业的“三定律”： IT平台20年左右的集中-分散周期



合 (Consolidate)

美国电气化过程的启示

- David E. Nye , 《Electrifying America: Social Meanings of a New Technology》, 《美国电气化》, MIT出版社, 1992年
- 在1880–1900年期间, 美国和英国只有小电站, **每个工厂、每条电车道都有自己的发电设备**。银行和股市支持私人发展电力。
- 上世纪初, 伦敦的电力有10种不同的频率、32种不同的电压、70种不同的电价。
- 为了实现电力系统的融合, 美国规定地方政府可控制的地区之允许用公共电力, 私人电力公司可在城市之间发展
- 近几年国外又在探讨**分布式的热电联产**的绿色智能电网系统。第二代能源系统成为21世纪能源工业结构调整的方向之一。

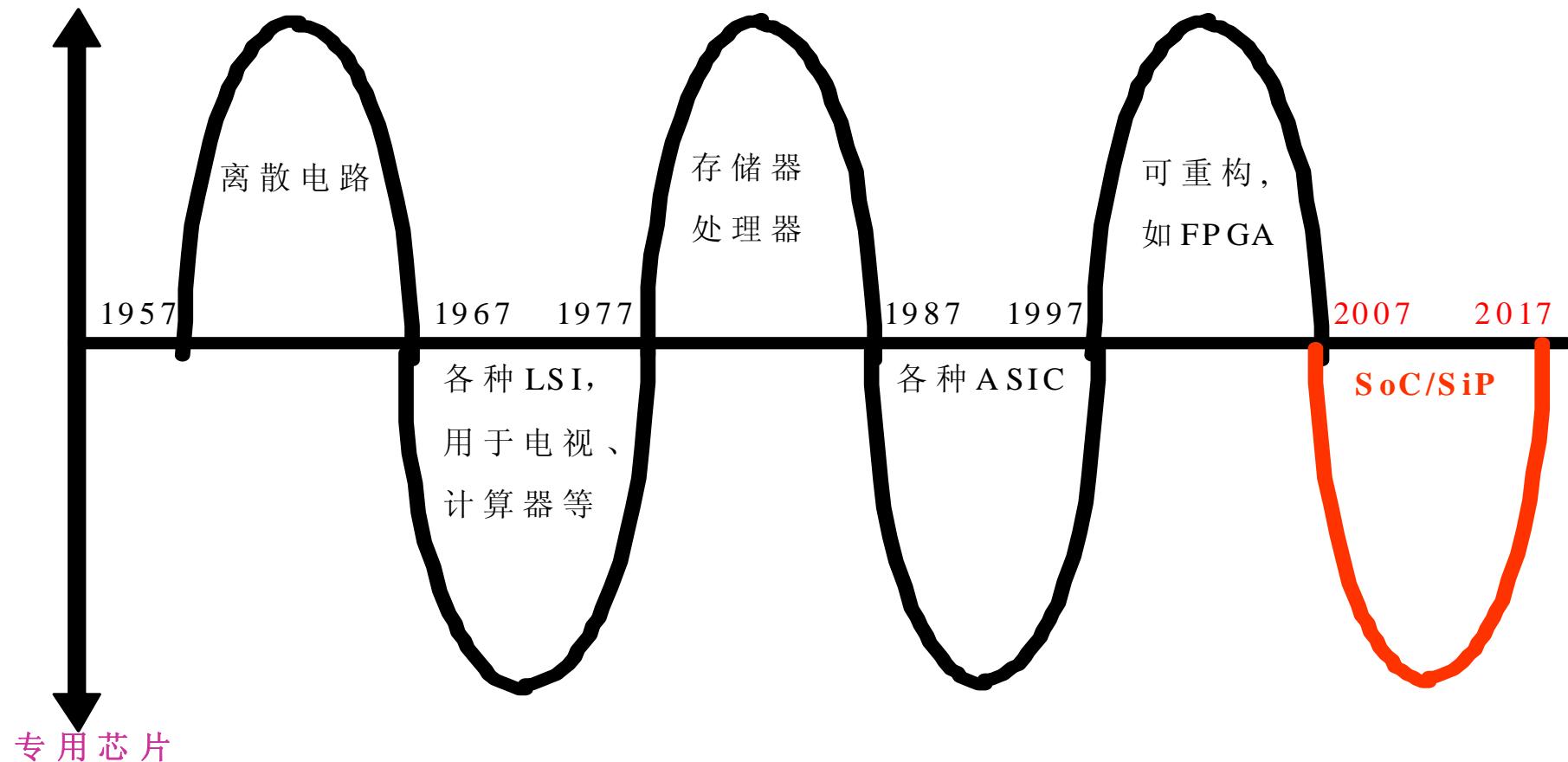


云计算的出现具有一定的历史必然性

- 信息技术领域呈现一种长期宏观现象，称为“**三国定律**”：每隔20年左右，计算模式会出现**集中-分散**交替主导的现象。云计算符合“三国定律”的宏观规律，有一定必然性。
- 云计算是网络计算的一个新阶段，既有集中又有分散，尚未完成下一个集中→分散转折，有专家称“**云计算是软件大型机**”。云计算也是我国走向信息社会的一个必经阶段。
- 云计算适应用户的需求和软件转向服务的发展趋势，体现了信息系统聚集的趋势—集中服务模式

通用与专用交替发展 — 牧村周期

标准、通用芯片



微电子技术的三个发展方向

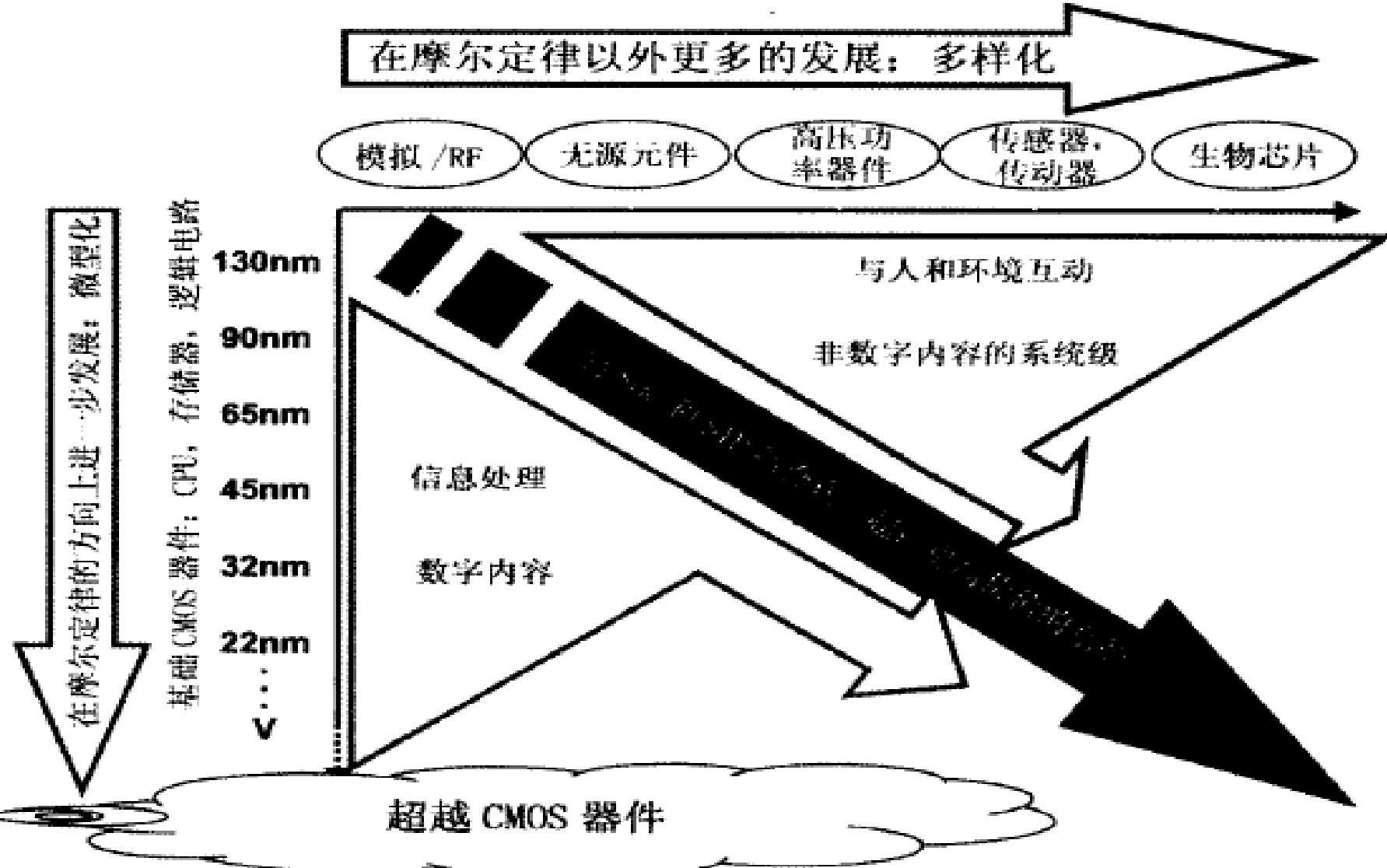


图 1 摩尔定律发展方向

需要确定新的主流器件技术

- 专家们预计到**2022年**线宽达到**11纳米**，大规模集成电路硅基传统的CMOS将接近技术极限。硅CMOS技术在速度、功耗、集成度、成本、可靠性等方面将受到一系列基本物理问题和工艺技术问题的限制。
- 传统的信息器件和设备在复杂性、成本、功耗等方面已遇到巨大障碍，急切期待颠覆性的新技术，但目前尚未涌现出一条像近30年CMOS集成电路一样的主导技术路线，**量子**、**自旋**、**纳米**等技术发展呈现出不确定性和多样性，确定新的主流器件技术可能需要**15-20年**的努力。

2007 ('07-'22) ITRS Technology Trends DRAM M1 Half-Pitch : 3-year cycle

Updated

Year of Production	2000 [Actual]	2001	2002 [Actual]	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2015	2016	2018	2019	2020	2022
Technology - Contacted M1 H-P (nm)	180	151	130	107	90	80	71	65	57	50	45	32	22	16	14			11	



2005 ITRS Flash Poly Half-Pitch Technology: 2.0-year cycle until **2yrs** ahead of DRAM @ 45nm/08

Year of Production	2000 [Actual]	2001	2002 [Actual]	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2015	2016	2018	2019	2020	2022
Technology - Uncontacted Poly H-P (nm)	180	151	130	107	90	76	65	57	50	45	32	22	16	13	10				



2005 ITRS MPU M1 Half-Pitch Technology: 2.5-year cycle; then equal DRAM @45nm/2010

Year of Production	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2015	2016	2018	2019	2020	2022
Technology - Contacted M1 H-P (nm)	180	157	136	119	103	90	78	68	59	52	45	32	22	16	14	11			



探索新原理器件

- 1) 共振隧穿器件 (RTD)
- 2) 纳米管和纳米线FET
- 3) 单电子器件 (SET)
- 4) 量子网络自适应器件 (QCA)
- 5) 分子电子器件
- 6) 自旋电子器件

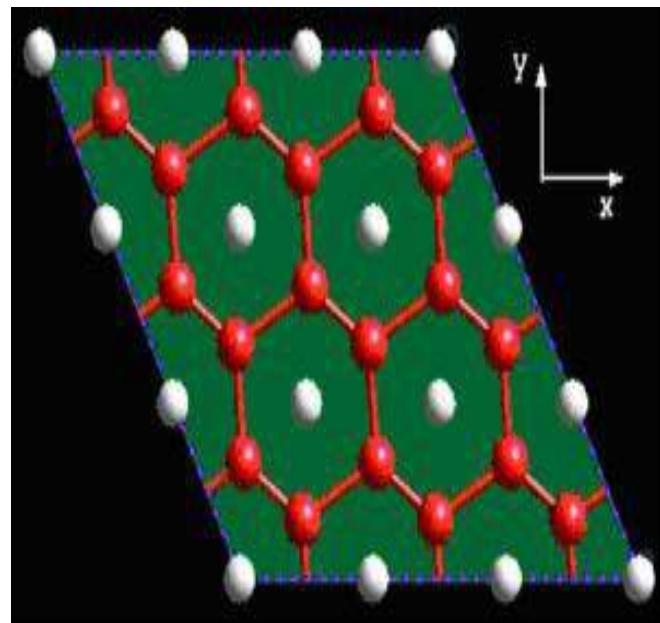
未来器件技术比较 (ITRS 2016)

Technology	Speed (min-max)	Dimension (min-max)	Energy per gate-op	Comparison
CMOS	30 ps-1 μ s	8 nm-5 μ m	4 aJ	
RSFQ	1 ps-50 ps	300 nm- 1 μ m	2 aJ	Larger
Molecular	10 ns-1 ms	1 nm- 5 nm	10 zJ	Slower
Plastic	100 μ s-1 ms	100 μ m-1 mm	4 aJ	Larger+ Slower
Optical	100 as-1 ps	200 nm-2 μ m	1 pJ	Larger+ Hotter
NEMS	100 ns-1 ms	10-100 nm	1 zJ	Slower+ Larger
Biological	100 fs-100 μ s	6-50 μ m	.3 yJ	Slower+ Larger
Quantum	100 as-1 fs	10-100 nm	1 zJ	Larger

n—p—f—a—z—y

有可能取代硅器件的石墨烯器件

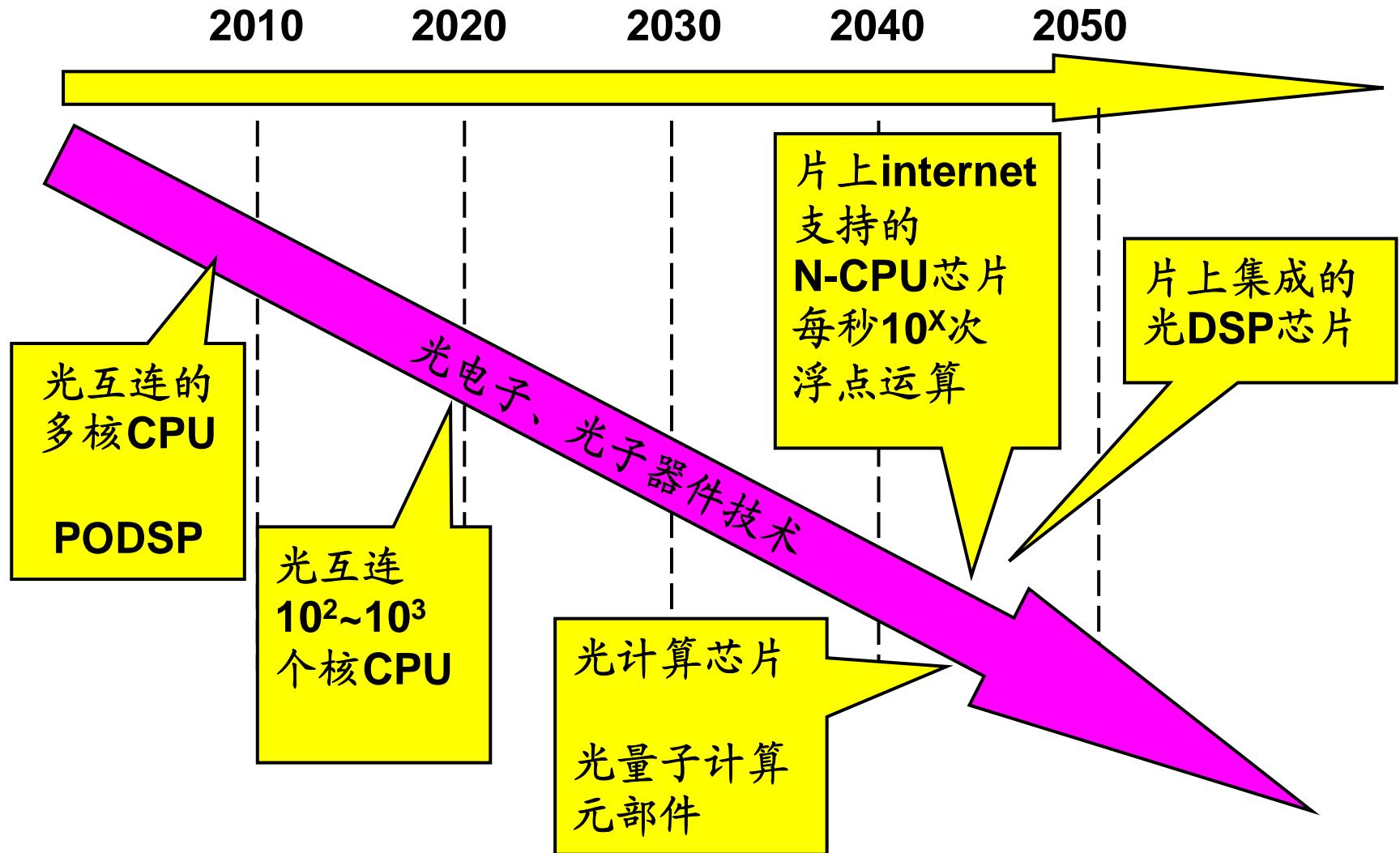
- 振奋人心的石墨烯纳米带晶体管的出现，可能成为延续摩尔定律极大的推动力，又**可能成为超越硅基CMOS的极有希望的研究方向**。
- 预计2020年左右可研制成功性能优异的石墨烯材料和晶体管，并解决其互连和集成等技术问题，2035年左右可研制成功石墨烯系统芯片，并形成规模化生产。这将使**碳基CMOS取代占据集成电路主导地位50多年的硅基CMOS**，给集成电路带来“革命性”的巨大变革。



CMOS技术与各种潜在技术的融合是不可避免的发展趋势

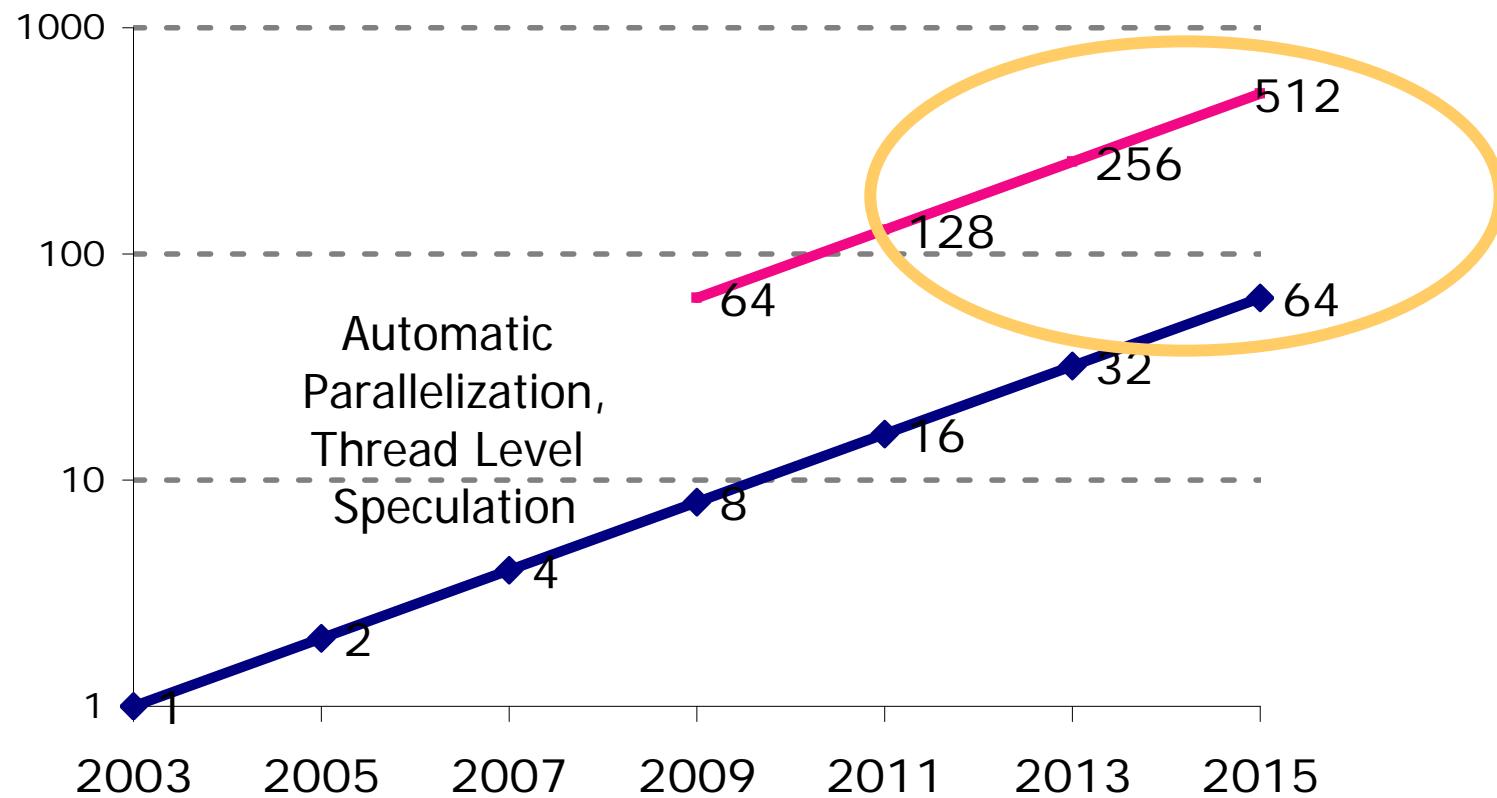
- 从产业技术发展来看，具备能在现有主流技术的基础上继往开来的前瞻性技术才会被产业界所接收和重视。
- 今后Moore定律的延伸主要受到巨大的产业投资风险的制约。将电子、光电子和光子器件融合起来的技术已经可以将现有CPU, DSP速度提高几万倍以上，最有可能成为未来能汇集计算、存储、通信和信息处理等多种功能的芯片。
- 量子计算、自旋电子计算、分子计算、DNA计算等技术必须和外部世界衔接，也一定离不开现有CMOS硬件，需要与它兼容。
- 目前的前瞻性技术的研发为CMOS技术与各种前瞻性技术的融合提供了可靠的支撑。

具有变革性的光电子,光子器件技术发展路线图



多核与众核芯片的发展趋势

- 多核（**Multicore**）发展速度每两年左右翻一番
即： $2X / 2 \text{ yrs} \Rightarrow \approx 64 \text{ cores in 8 years}$
- 众核（**Manycore**）中CPU核数目是多核的8 – 16倍



超级计算机发展路线图

时间	2020年	2030年	2050年
器件	CMOS	纳米量子器件	量子、生物分子
计算速度	Exaflops (10^{18})	Zettaflops (10^{21})	>Yottaflops (10^{24})
并行度	10^8	$10^{10} - 10^{12}$	$10^{13} - 10^{15}$
内存容量	25PB	EB (10^{18} B)	ZB (10^{21} B)
功耗	40MW	MW	MW
用途	核聚变模拟 蛋白质折叠等	地球模拟 生命科学等	MEMS优化 脑科学模拟等

2010

2020

2030

2050



挖掘并行性是对信息科学的巨大挑战

时间	2020年	2030年	2050年
器件	CMOS	纳米量子器件	量子、生物分子
计算速度	Exaflops (10^{18})	Zettaflops (10^{21})	>Yottaflops (10^{24})
并行度	10^{8-9}	10^{10-12}	10^{13-15}
内存容量	25PB(10^{15} B)	EB (10^{18} B)	ZB (10^{21} B)
功耗	<10MW?	? MW	? MW
用途	核聚变模拟 蛋白质折叠等	地球模拟 生命科学等	MEMS优化 脑科学模拟等

2010

2020

2030

2050



必须突破并行编程模型

- 几十年来由于微处理器一直按照Moore定律预测的性能增长速度争发展，使得并行处理得不到强烈的需求牵引，导致以并行计算机为主业的公司几乎全部夭折。
- 单处理器性能的提高遇到阻碍以后，计算机要提高性能基本上只剩下一条路可走—依靠并行处理。过去几十年的编程模式主要的串行，**现在必须转到并行编程**，这一迫不得已的转变，对软件界既是挑战也是机遇。
- 未来的微处理器少则几个十几个核，多则数千个核，连每个用户手中的终端都是多核处理器，如何让一个任务分解到多个核中运行成为今后编程的大问题。在现有串行编程模型上做并行化没有出路，一定回到原始问题，**从新考虑并行算法和并行编程**，这可能是今后几十年计算机科学和软件界必须突破的科学问题和关键技术。

软件与人机交互

- 发展信息技术的一个重要目标是使软件业和服务业也产生类似摩尔定律的走势，即同样功能和性能的软件开发成本平均每两年降低50%，同样质量的服务所需的成本每两年降低50%。
- 人机交互是计算机科学/工程研究的核心之一。在未来几十年中多模态人机交互将占据桌面、膝上和掌上系统，三维用户交互、实体交互、可交流情感的个性化交互、脑机交互将得到普及。在人机交互研究领域，自然语言理解、图像语义理解是需要长期攻克的科学难题和关键技术。

非传统计算机的发展前景

- 最先走向市场的非传统计算机可能是**纳米计算机**，预计**2025**年前后开始商品化。新的纳米计算机在功耗和成本上应具有较大优势。
- 量子计算机虽然报道很多，但目前还看不出什么时候能研制出通用的量子计算机。目前研制的量子计算机只能计算几个特殊的题目。**2020**年以前专用量子计算机可能商用化，但**2030**以前难以出现通用的量子计算机。
- 与量子计算机类似，生物计算机（**DNA**计算机）还需要在计算模型上做巨大努力，目前量子计算和生物计算都只能做**SIMD**计算（单一指令多数据流计算）。
- 光通信技术将在大量用于计算机，不但在机柜及电路板之间上采用光通信，**不久的将来芯片内部也会采用光通信**。但全光计算机（即采用光逻辑线路）是否优于光电混合计算机还有待实践检验。

量子计算与量子通信

- 量子信息为信息科学的发展提供新的原理和方法，有望成为后摩尔时代的新一代信息技术之一。
- 量子计算的实现**不存在原理性的困难**，当前的研究瓶颈在于量子计算的**物理实现**，基于**固态物理系统**和**基于量子光学系统**最有希望研制成功量子计算机。
- **量子密码技术**已到了工程研究和实际应用阶段，预计2020年可实现70公里内的城域光纤网量子密钥分配，2050年可实现基于量子密钥分配的全球实用安全通信网络。

我国的量子计算发展的路线图

● 2020年：

- 建立容错量子计算实验平台，包括**50-80个量子比特**：
- 实现量子编码，即将若干物理量子比特编成逻辑量子比特；
- 逻辑门操作达到容错阈值；
- 实验演示相关量子算法；
- 开展量子模拟的实验研究；
- 开展分布量子计算等的实验研究；
- 研究容错量子计算机的结构等。

● 2030年

- 研究成功中小型量子计算机，**200个左右物理量子比特**
- 研究新的量子算法；
- 量子计算的数字运算和模拟运算的实验研究。

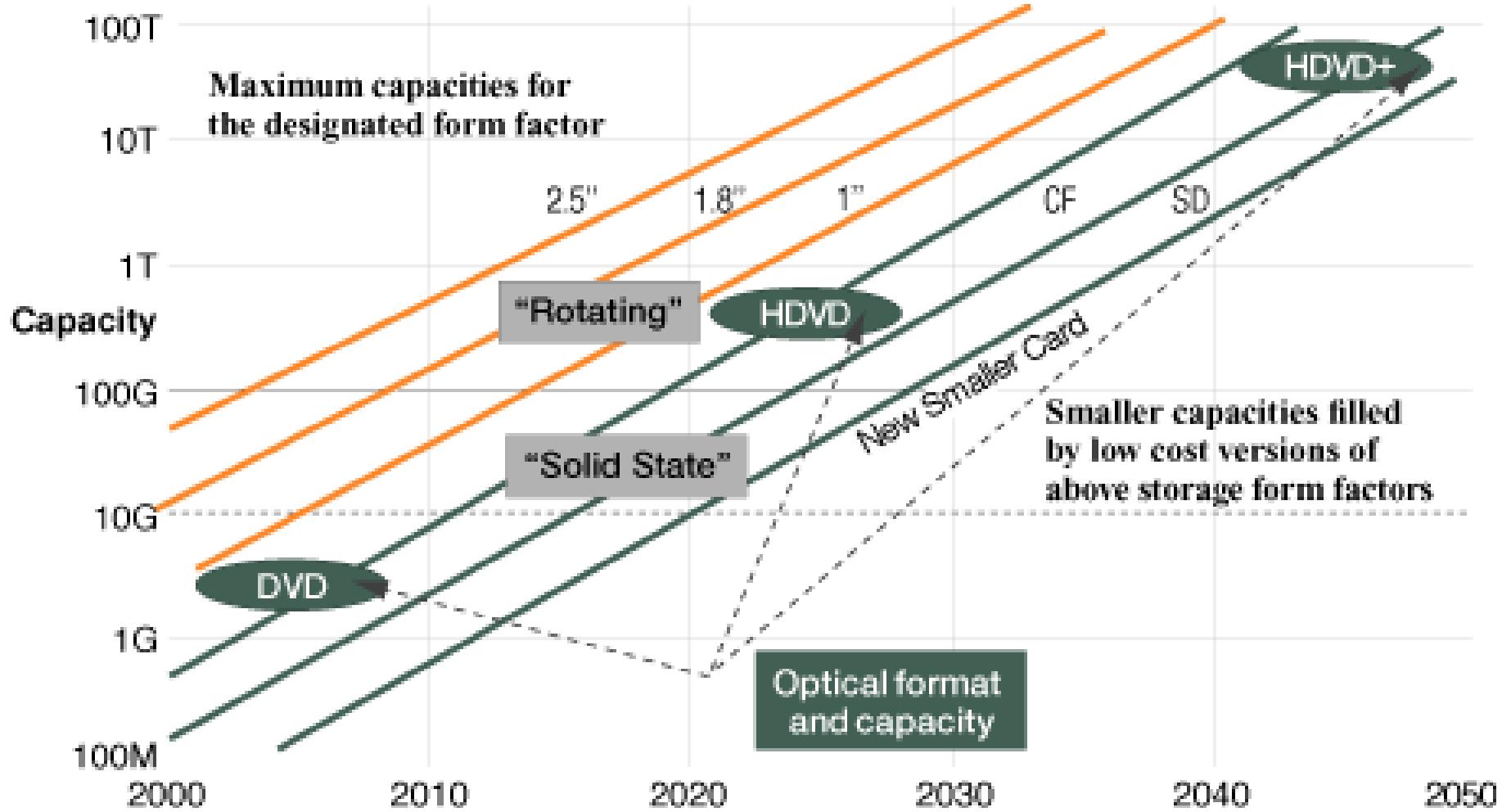
● 2050年

- 研究成功**通用量子计算机**并提供实际使用。

存储技术发展趋势

- 以闪存为代表的半导体存储有在低端取代小型磁盘的趋势。相变内存（PCM）、电阻式存储器（RRAM）等正在快速发展，多位单元（MLC），3D闪存技术也在研究中，半导体存储的存储密度有可能逐渐超过磁盘。**预计5-10年后，闪存可能在低端全面取代磁盘。**
- 磁盘5年内仍将保持40% 左右的年增长速度，2015年前后将可能达到5Tb/平方英寸的密度，**2020年左右，可以实现50Tb/平方英寸密度。**
- 真正有可能替代磁盘的大容量存储技术是基于**光的存储**技术，全息存储可能会替代现有的蓝光DVD技术，**2020年以后逐渐占据主流地位。**
- 预计到2030年以后，**原子级存储**可能作为后继发展的技术走向前台，到2050年左右成为主流技术。

到2050年个人计算机将拥有TB级存储



电阻式随机存储器(RRAM)和 忆阻器 (memristor)

- 新型非易失性存储 RRAM制备简单、擦写速度快(<100纳秒)，储密度高, M有望成为未来主流的存储技术
- 忆阻器的发现足以媲美100年前发明的三极管，它的任何一项产业化应用都可能带来信息产业革命性的进步。
- 忆阻器的最有趣特征之一是可以记忆1到0之间所有的“灰色”状态，类似于人类大脑记忆模式。这样的硬件用于脸部识别技术，可以比数字式计算机上运行程序快几千到几百万倍。。

加州大学伯克利分校教授蔡少棠，1971年发表《忆阻器：下落不明的电路元件》论文，提供了忆阻器的原始理论架构。忆阻器的发明类似 根据门捷列夫周期表发现新元素。



HP公司研制的忆阻器

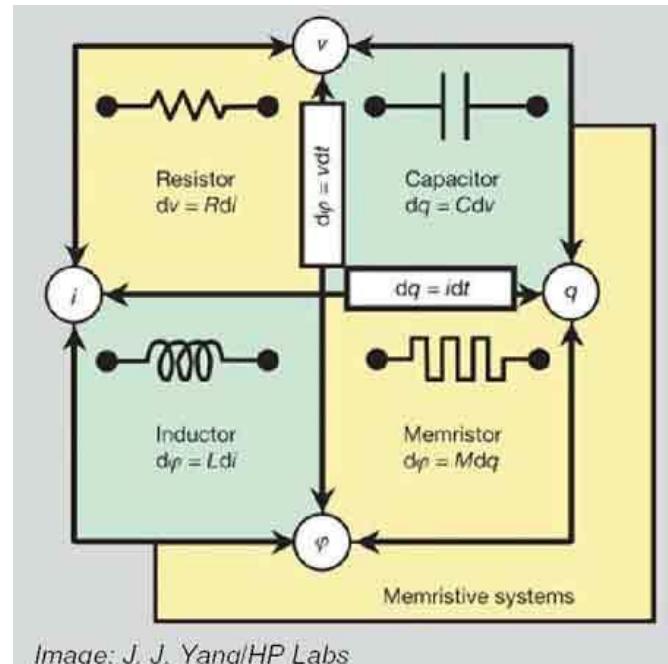
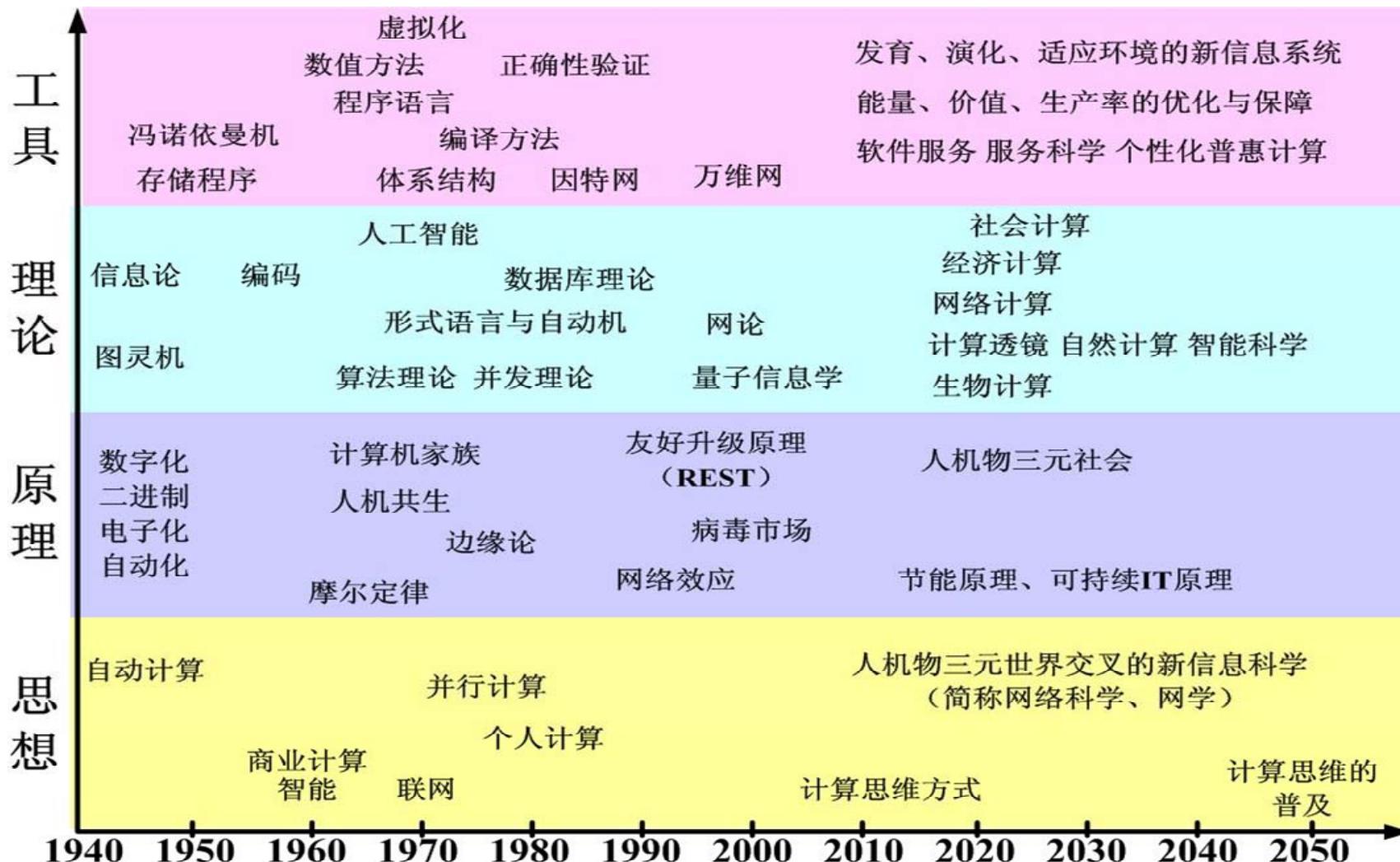


Image: J. J. Yang/HP Labs

未来显示技术

- 基于有机发光材料的显示技术（OLED）
- 3D显示技术；
- 电泳显示技术（电子纸）
- 可折叠卷曲的显示技术；
- 输入输出投影显示技术；
- 激光显示
- 3D将会形成新业务模式的机遇，预测三年后全球市场总规模有可能超过500亿美元。
- 一条大屏幕激光电视屏生产线的投资可能远低于LCD生产线的成本。但目前激光电视机的成本太高，必须有50亿元以上的投入做中试和产业化研究，才能取得市场竞争优势。

至2050年信息科学各层次的重要研究方向



发展数据与知识服务产业

- 互联网也好，信息服务产业也好，将来的瓶颈都在计算机对语义的理解。发展语义互联网技术是实现全民应用互联网的重要途径。
- 我们必须挖掘和利用中华文明的特色，研究支持语义、内容和文化的科学技术与普惠信息网络基础平台，使**网上中文信息内容**超过全世界网上信息总量的**10%**，为**发展中国特色的数据知识产业**提供科技基础。

发展真正的网络科学

- 网络领域引用率最高的6篇论文中有4篇发表在Science, Nature 和Reviews of Modern Physics。
 - Scale Free Model 完全不符合Internet的真实情况
 - Network Science Community 和 Network Research Community 必须相互交流， 才能对网络有正确的认识。
-
- 网络科学是研究人机物三元世界的网络共性规律、表达模型和计算理论的新兴学科，涉及经济、社会等和信息科学交叉领域所面临的科学问题。网络科学将会提出新的网络信息理论的概念并发展新的理论体系。

计算机科学需要本质性的突破

- 计算机学科是技术跑在科学前面的典型，有人说计算机科学现在只相当 **1905年的核物理学**，也有人说根本还没有计算机科学，但计算机及其带动的产业已成为国民经济的支柱产业。
- 从可计算性和计算复杂性理论来看，不可计算的问题远多于可计算的问题，计算机真正能严格求解的问题很少。不从图灵可计算的束缚中解脱出来，计算机科学难有大的作为。努力的一个方向是 **寻求新的问题表示方法和非精确求解的新方法**。
- 学术界普遍认同计算机科学是研究算法的科学，但过去只研究解决同一类问题的单个算法，今后的重点应放在研究 **相互影响的多个算法** (*Science of Algorithm Interactions*)，研究适应网络环境多个算法的协同求解。

新的建模理论与技术

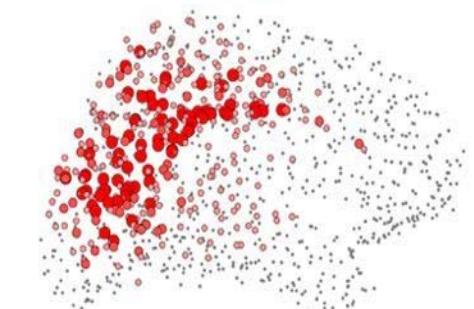
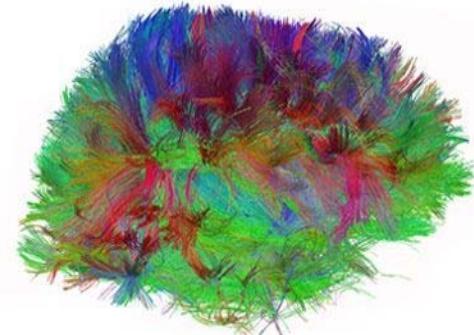
- 建立计算模型要求有很深的数学背景，从方法论上讲，目前数学建模还是属于“黑客”（‘hackers’）的领域。
- 实验与模型的缠绕需要一种方法论去组织数据和计算资源，需要一种成熟的框架去管理模型和复杂的动态关系。
- 现在需要新的数据模型、系统结构和高明的控制机制去支持细粒度的不同种类的科学工作流集成到一个交织在一起的科学过程。

生物计算与社会计算

- 从计算的角度为细胞的发展过程建立模型，不仅有助于理解生物系统中的大量的基因和蛋白质如何协调工作控制细胞的新陈代谢及DNA修复等基本问题，而且对于**通信协议设计、并行计算模型**和机制的研究也具有重要意义。通过对生物分子和DNA等层次生命活动中信息转化过程的分析，可能**产生与基于硅的电子计算机原理完全不同的计算系统**。
- **社会计算**已成为继科学计算、生物计算之后新的国际前沿研究和应用方向。以认知科学、智能科学和复杂性科学为基础，开展社会计算研究和应用，已成为确保国家安全、建设和谐社会刻不容缓的任务。

发展智能和认知科学技术

- 基于**认知机理**的智能信息处理在理论与方法上的突破，有可能带动未来信息科学与技术的突破性发展。
- 智能科学是脑科学、认知科学、人工智能等共同研究形成的交叉学科。智能的研究不仅要运用推理，自顶向下而且要通过学习，由底向上，两者并存。
- 近年来国外在**脑科学研究**、**脑反向工程**、**神经工程**等方面取得不少进展，相对国外而言，我国对脑科学和认知科学的研究还不够重视，今后要加大力度。



重视脑科学与信息技术的结合

- 国外的科学家普遍认为：“**Neuro**”已成为新的”Nano”,2009年是脑科学和神经工程学 (**Neuroengineering**)历史上关键的一年。
- 神经工程学，脑反向工程是脑成像技术、神经系统成像技术、计算神经学等领域的交叉科学，近年来发展迅猛。
- 我国制定中长期规划时，**脑科学没有得到足够的重视**，应该与量子调控、蛋白质科学放在同样的地位。
- 国内各学科画地为牢，不希望其他学科打进自己的领地，严重影响交叉学科发展，未来十年要打破学科领域的限制，高度重视脑科学与信息科学的交叉融合。

Thank You!

请批评指正！

