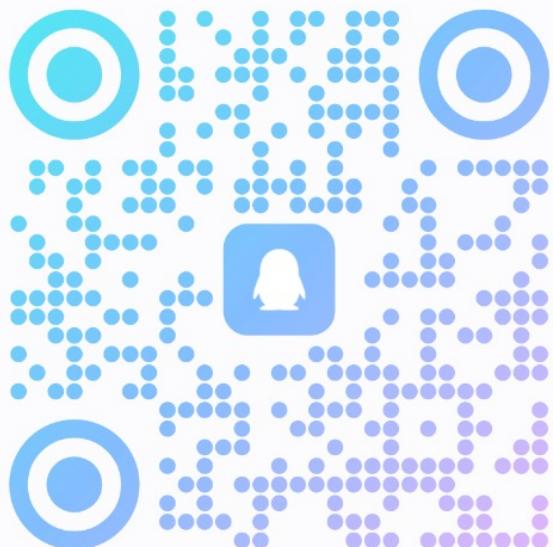


力学 (Classical Mechanics)



2025力学A教学
群号: 679742305



徐来林(lailinxu@ustc.edu.cn)

中国科大近代物理系，物质科研楼A601

2025年9月

助教:

师驰昊 PB23000189 (sch20061107@mail.ustc.edu.cn)

疏宇 PB23000239 (shuyu2023@mail.ustc.edu.cn)

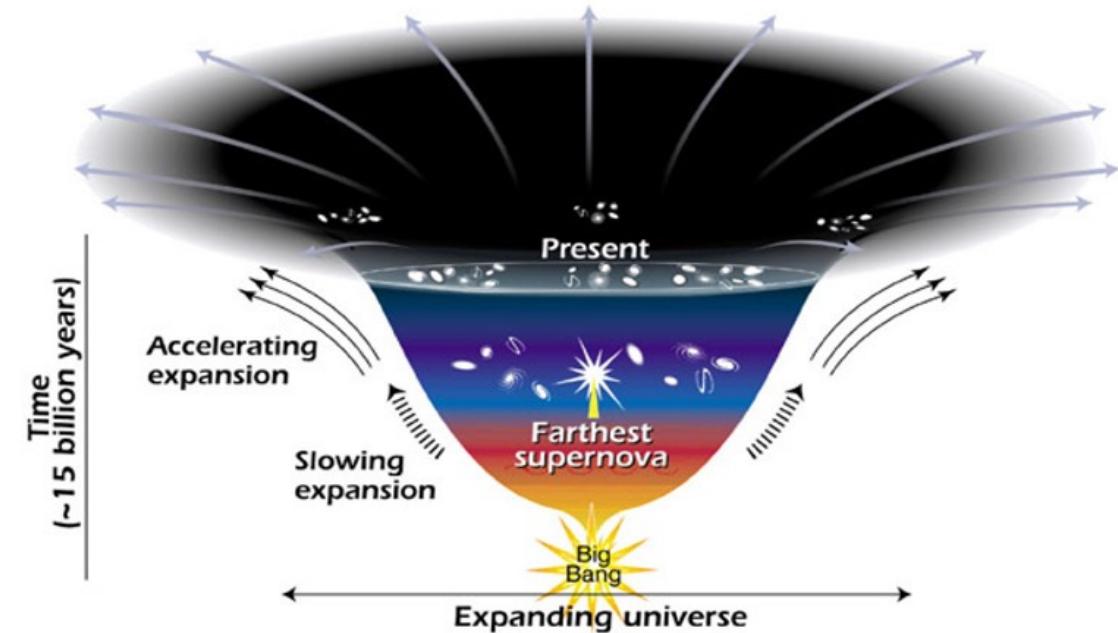
Outline

- 绪论
 - 宇宙的起源
 - 科学的起源
 - 牛顿力学的诞生
- 《力学》三问
 - 力学是什么？为什么要学？怎么学？
- 课程简介
 - 联系方式
 - 考核要求
 - 教学大纲
 - 课程资源

宇宙的起源

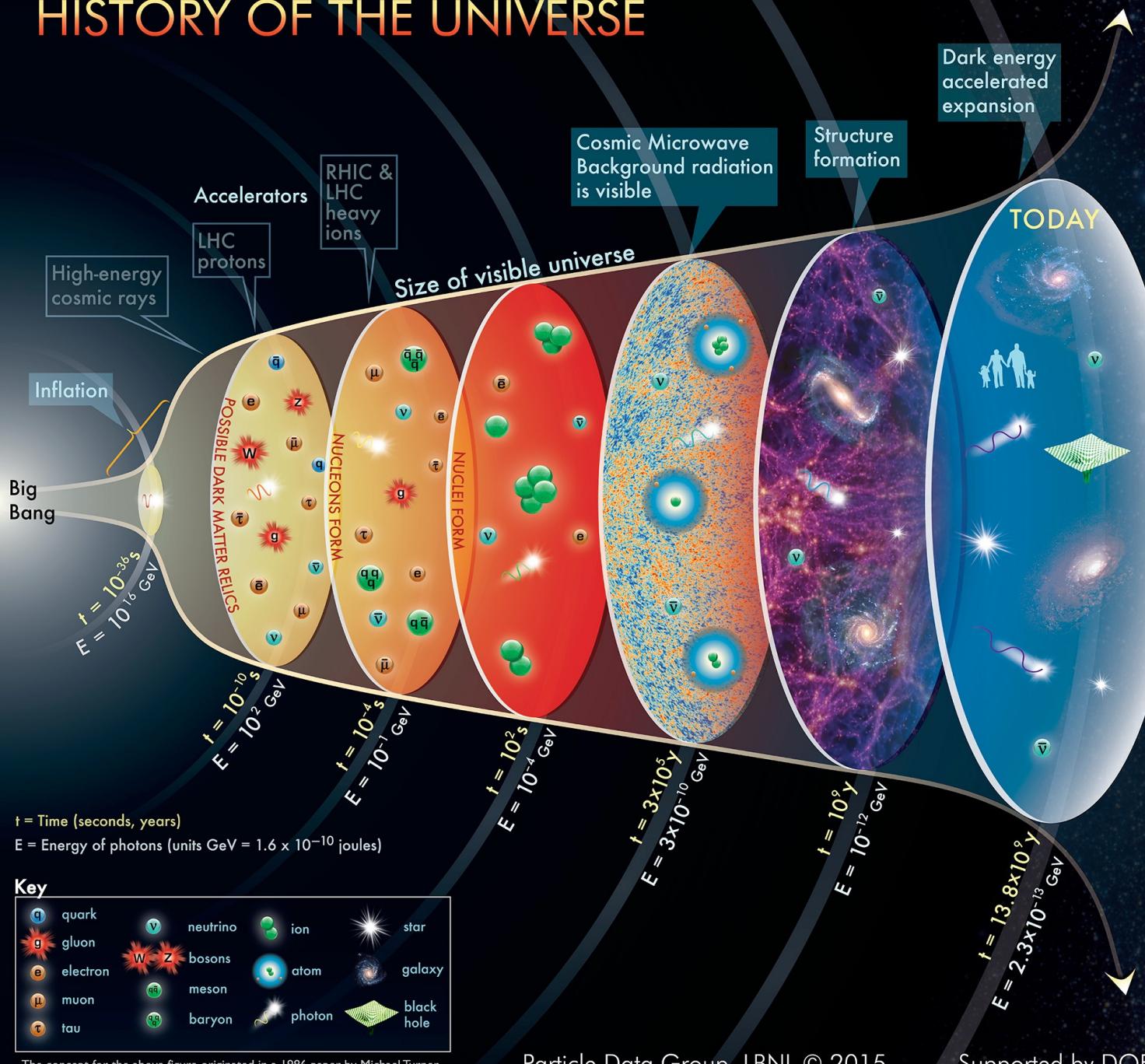
时间从哪里来？空间从哪里来？物质从哪里来？

宇宙的起源



宇宙起源于一次“大爆炸” (the Big Bang) → 空间的膨胀
“大爆炸理论”得到了当今科学的研究和观测最广泛且最精确的支持

HISTORY OF THE UNIVERSE



Time since the Big Bang	Temperature (K)	Epoch 时期	Era 纪元
$0 - 10^{-43} \text{ s}$	undefined	Planck	
$10^{-43} - 10^{-35} \text{ s}$	10^{32}	GUT	
$10^{-35} - 10^{-12} \text{ s}$	10^{27}	Electroweak (Inflation)	Radiation dominated
$10^{-12} - 10^{-5} \text{ s}$	10^{15}	Quark	
$10^{-5} - 1\text{s}$	10^{13}	Hadron	
$1 - 10 \text{ s}$	10^{10}	Lepton	
$10 - 1000 \text{ s}$	$10^9 - 10^7$	Big Bang Nucleosynthesis	
$10 \text{ s} - 370 \text{ ka}$	$10^9 - 4000$	Photon	
$47 \text{ ka} - 9.8 \text{ Ga}$	$10^4 - 4$	Matter dominated	
$> 9.8 \text{ Ga}$	< 4	Dark Energy dominated	
13.7 Ga	2.7	Today	

ka (kilo annum, 千年), Ga (giga annum, 十亿年)

“Science writing at its best.”

—Martin Gardner, *New York Review of Books*

THE FIRST THREE MINUTES

A MODERN VIEW of
the ORIGIN of the UNIVERSE

STEVEN WEINBERG

Winner of the 1979 Nobel Prize for Physics



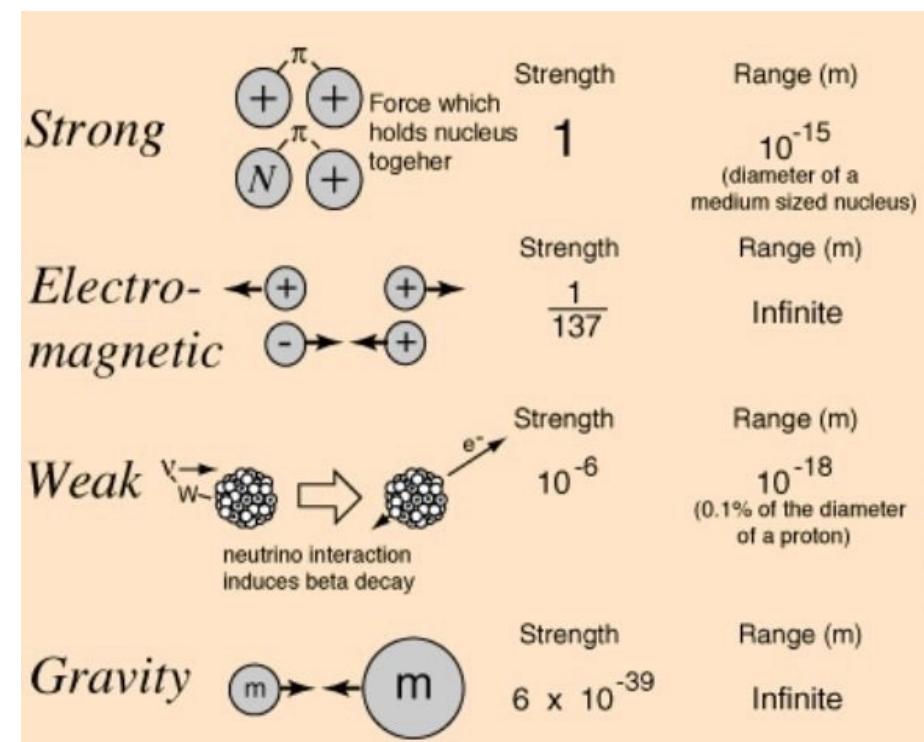
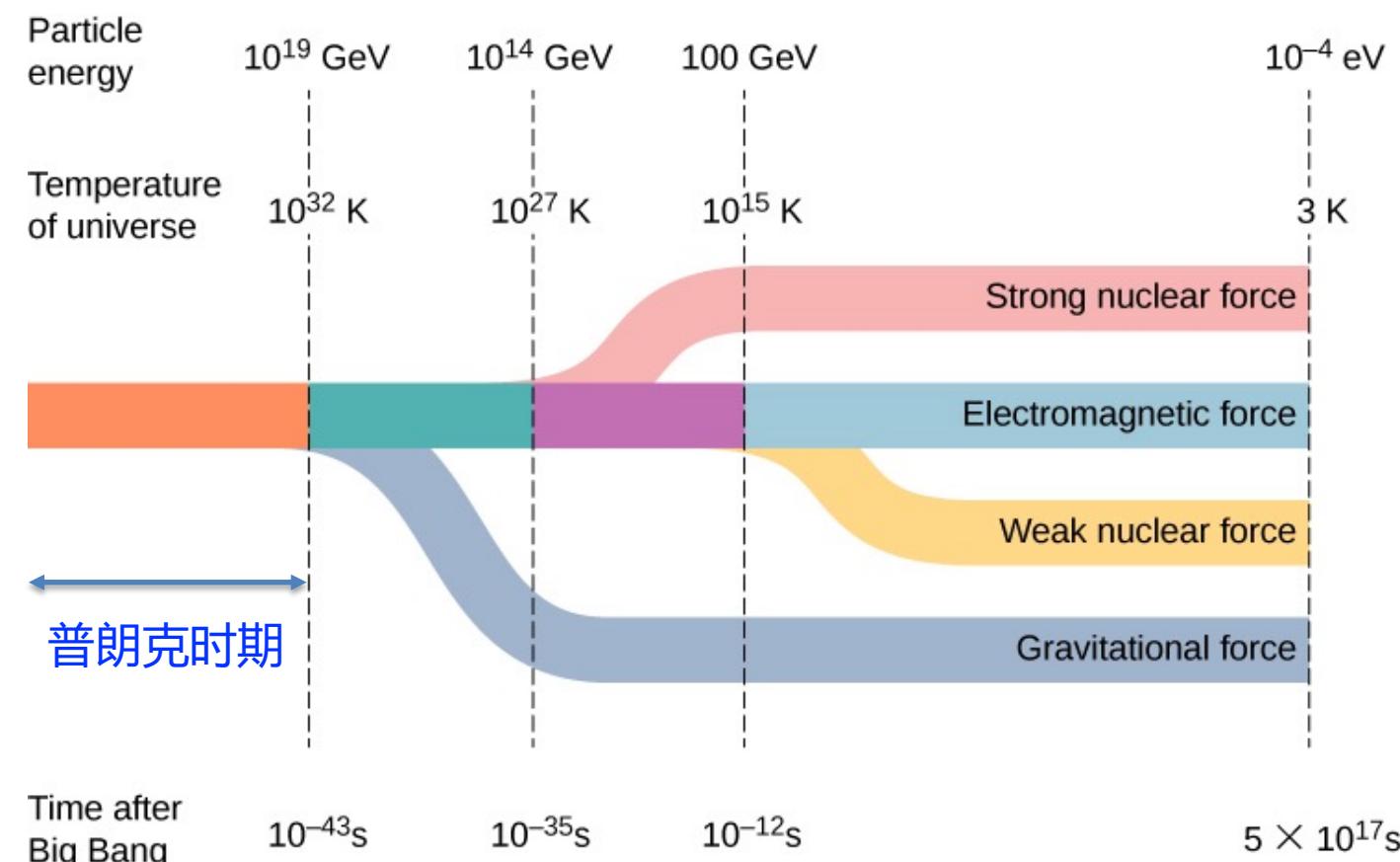
Steven Weinberg(1933-2021)
因提出基于对称性自发破缺机制的
电弱理论，与萨拉姆和格拉肖获得
1979年诺贝尔物理学奖

普朗克时期

- 普朗克时期 (Planck Epoch) : 从大爆炸开始至 10^{-43} 秒

- 持续的时间大约为一个普朗克时间 $t_p \approx 5.4 \times 10^{-44}$ 秒

- 四种基本力 (万有引力、电磁力、弱核力、强核力) 还都统合成一种基本力



普朗克时间和尺度

- 普朗克时间： t_p 最小的时间单位，光波在真空中传播一个普朗克长度的距离所需的时间
- 普朗克长度： $l_p \approx 1.6 \times 10^{-35}$ 米，被认为是最小的长度
- 有趣的是，从三个普适物理常数：万有引力常数 G ，普朗克常数 \hbar ，真空中的光速 c ，可以构成量纲分别为时间、长度和质量的常数

$$G = 6.68 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 6.58 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

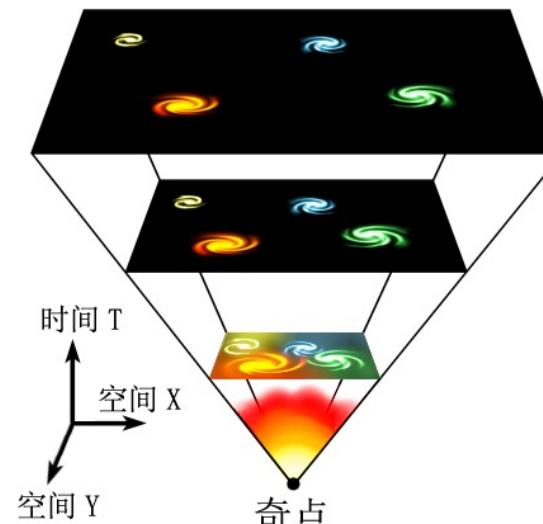
$$t_p = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} \approx 5.4 \times 10^{-44} \text{ 秒}$$

$$l_p = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \approx 1.6 \times 10^{-35} \text{ 米}$$

$$m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 2.2 \times 10^{-8} \text{ kg} = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV}$$

1912年，德国物理学家普朗克在所著《热辐射理论》一书中提出

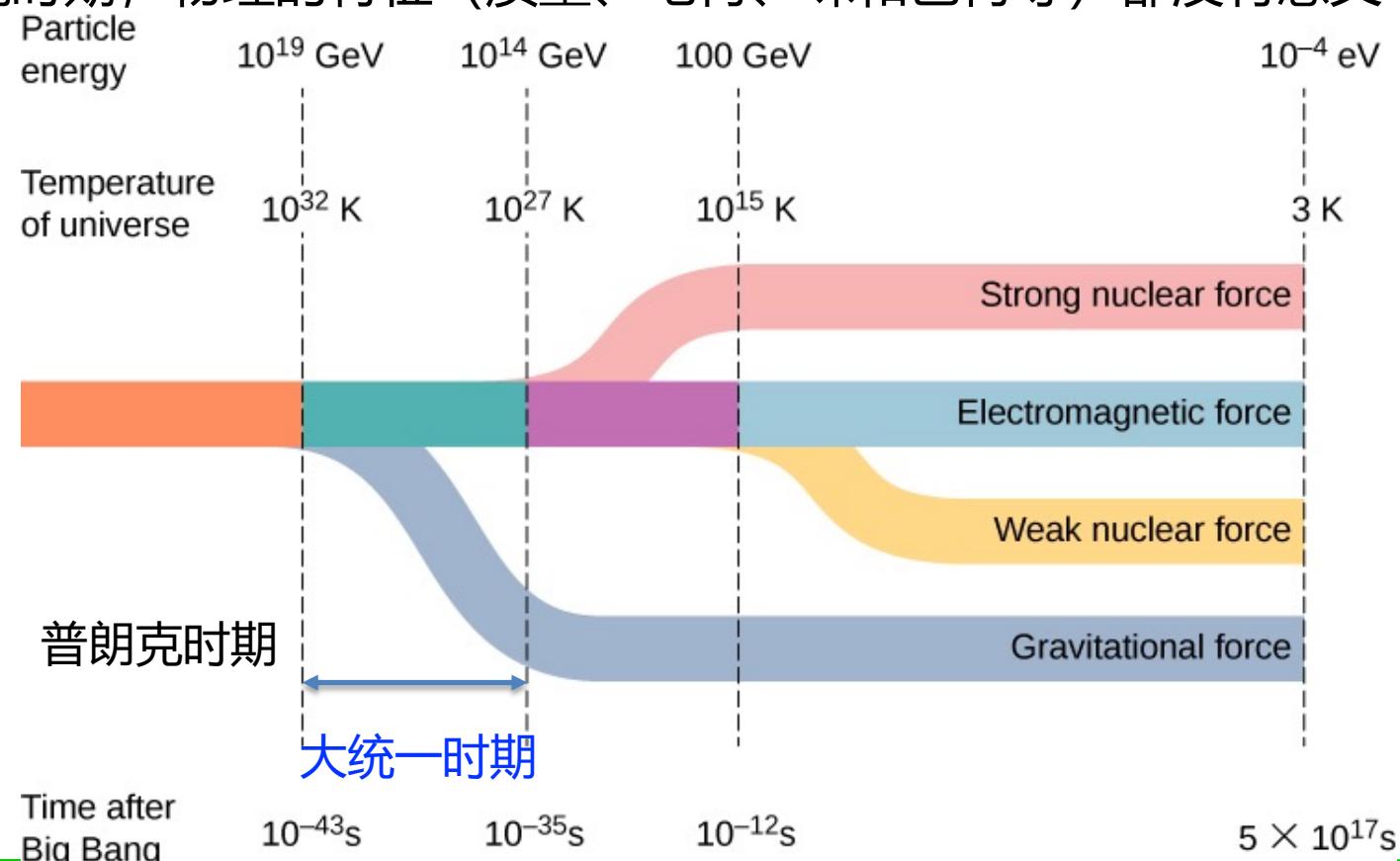
在普朗克标度下，现有的物理理论（量子场论、广义相对论）失效，引力预期开始会展现量子效应



由于普朗克常量是量子性的标志，我们将作为经典宇宙的开端，而不去讨论“引力量子化”、“时空奇点”等目前尚不清楚的问题

大统一时期

- Grand Unified Theory Epoch, 大爆炸后 $10^{-43} - 10^{-35}$ s
 - 在这一段时期，四种基本力中的三种 - 电磁力、强作用力和弱作用力 - 是合而为一的电子核子力
 - 引力在普朗克时期结束时从电子核子力中分离出来
 - 在大统一时期，物理的特征（质量、电荷、味和色荷等）都没有意义

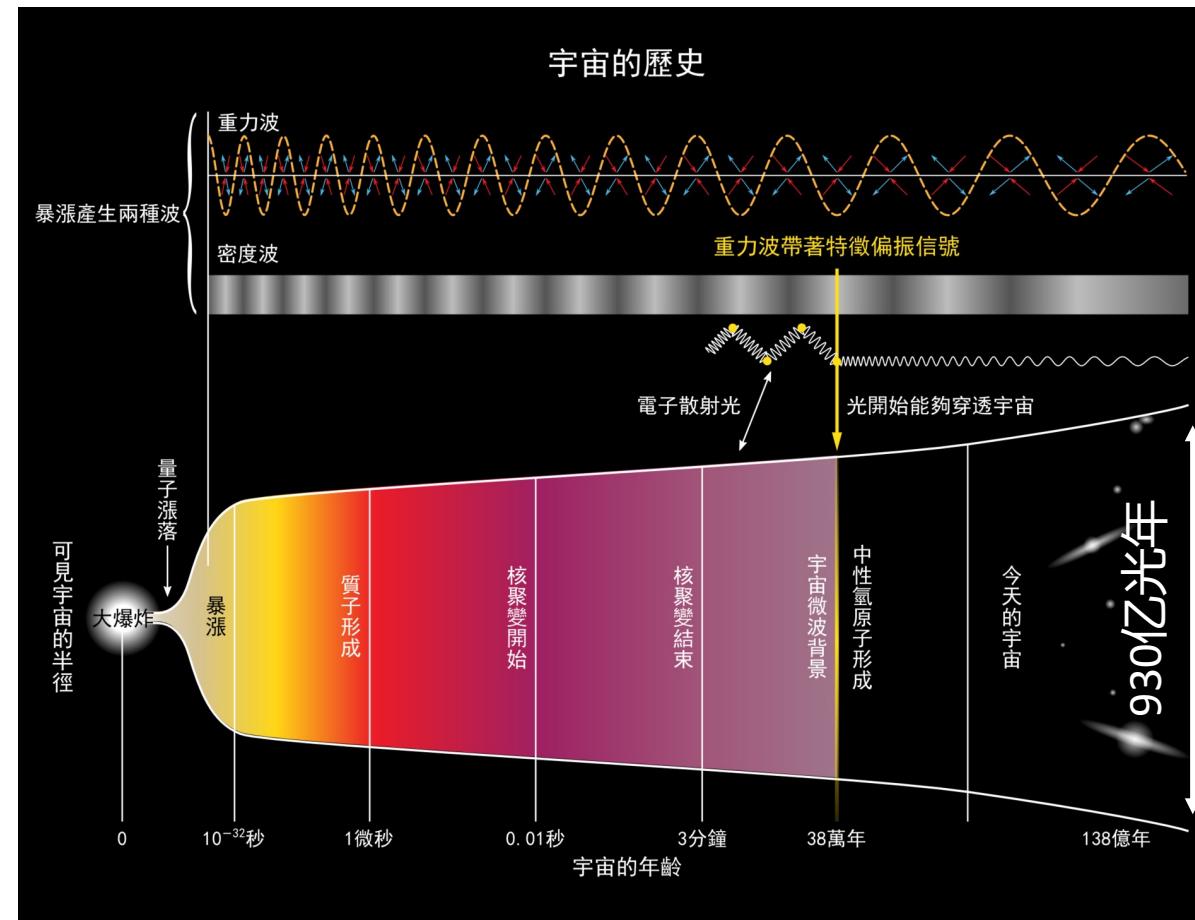


电弱和暴涨时期

- **电弱时期 (Electroweak Epoch)**: 大爆炸后 $10^{-35} - 10^{-12}$ s
- **暴涨时期 (Inflation Epoch)**: 大爆炸后 $10^{-35} - 10^{-32}$ s

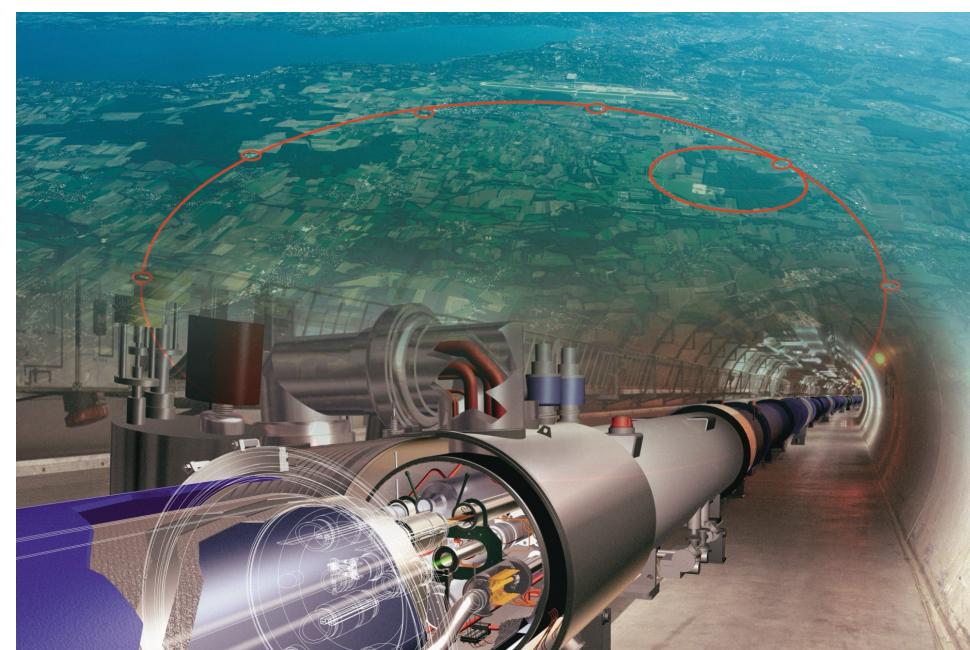
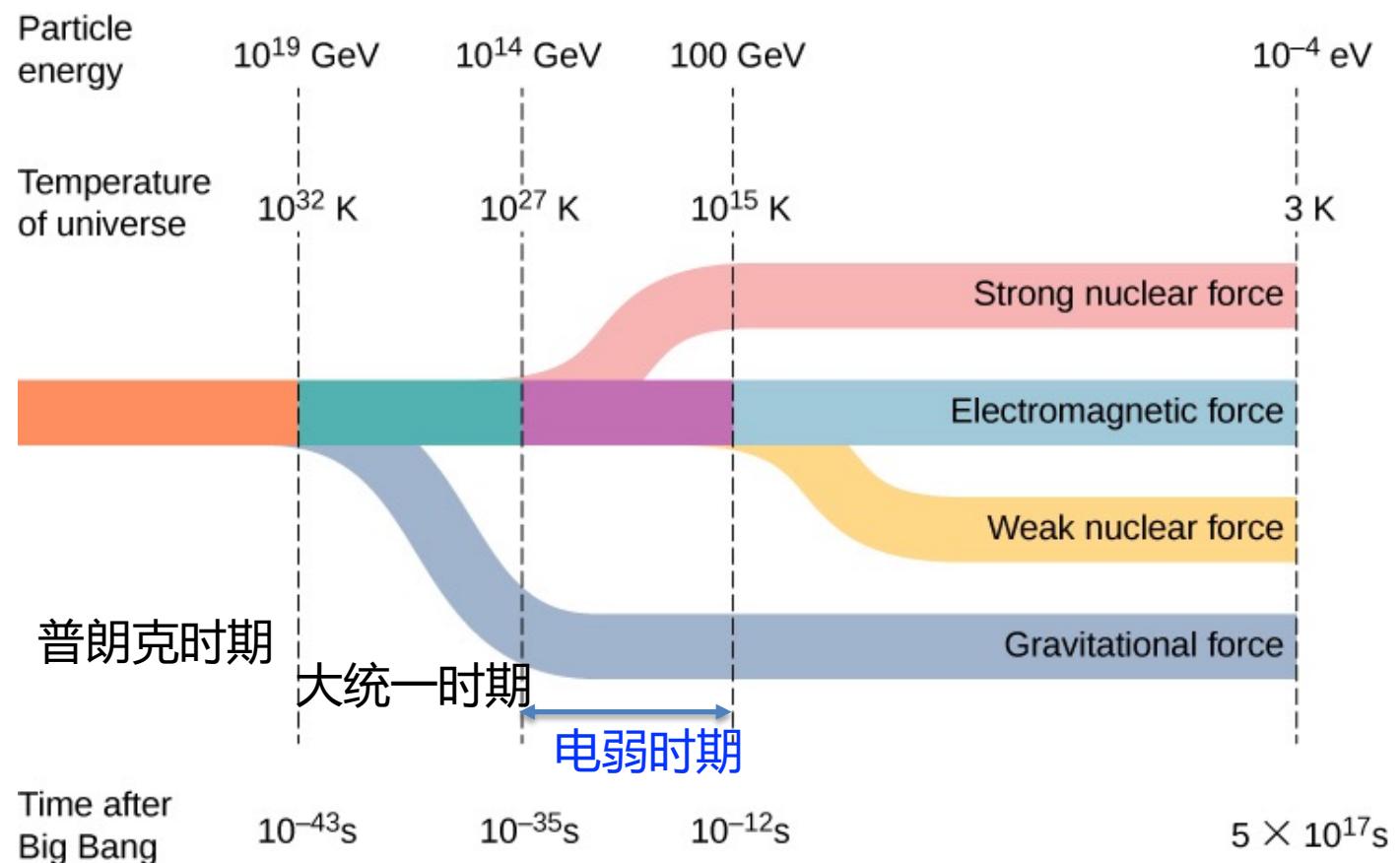
- 早期宇宙的一种空间膨胀呈加速度状态的过程
- 空间膨胀约 10^{25} 倍
- 暴涨之后，宇宙继续膨胀，但速度则低得多
- “暴涨”一词可以指有关暴涨的假说、暴涨理论或者暴涨时期。这一假说以及“暴涨”一词，最早于1980年由美国物理学家阿兰·古斯 (Alan Guth) 提出
- 导致暴涨的假想粒子称为暴涨子(Inflaton)，其伴随的场称为暴涨场

视界问题 (Horizon problem) : 在宇宙学原理的前提下，宇宙为何会显得具有**同质均匀性**和**各向同性**。在一个缺乏暴涨过程的宇宙中，两个相隔遥远的区域还没有机会彼此“接触”对方，却仍然具有相同的温度（已达致热平衡）。这种接触需要信息的传递，而传递速度不能超过光速



电弱和暴涨时期

- **电弱时期 (Electroweak Epoch): 大爆炸后 $10^{-35} - 10^{-12}$ s**
 - 强力从电弱相互作用中分离
- 暴涨时期的暴涨场位能释放导致宇宙的暴涨，使宇宙充满了浓密、热的**夸克-胶子等离子体** (Quark Gluon Plasma)
- 在这个阶段有着高能量的粒子相互作用创造出大量的不稳定粒子，包括**w及z玻色子**和**希格斯玻色子**

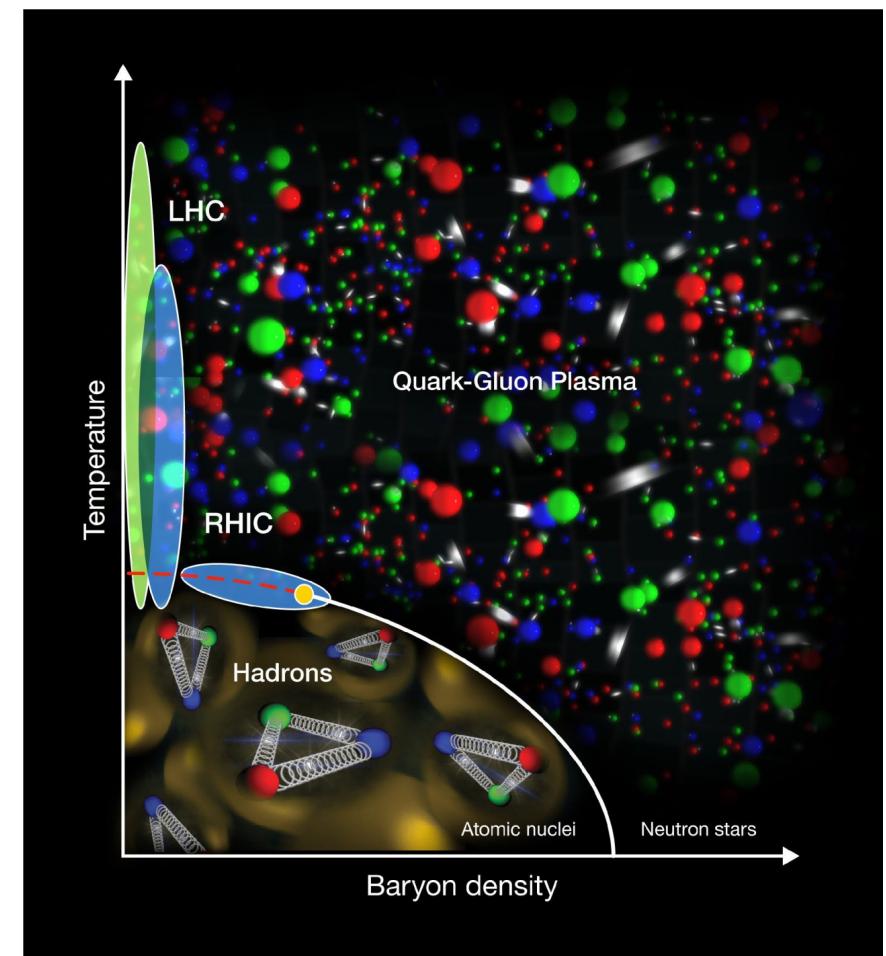
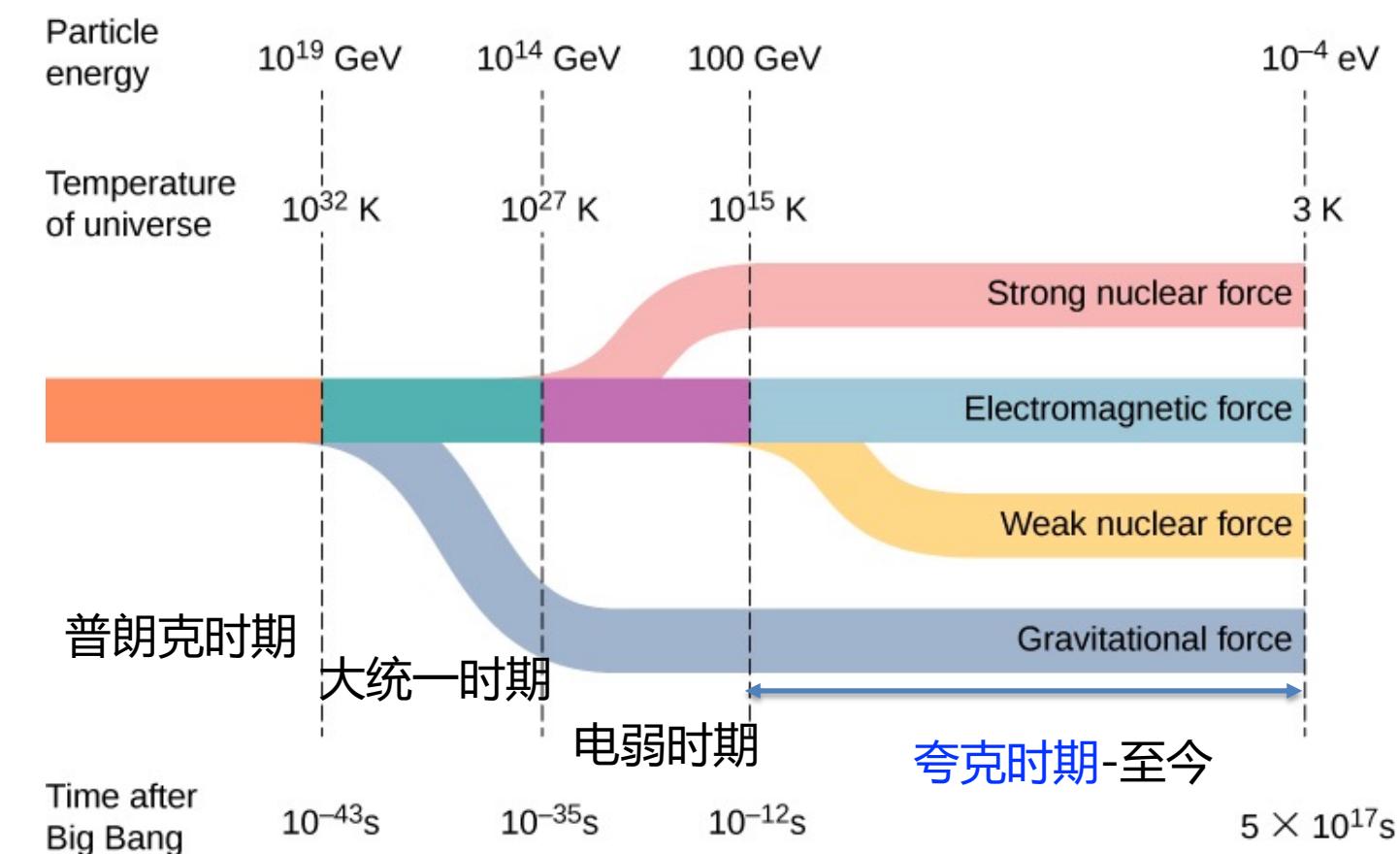


欧洲核子中心 (CERN) 的大型强子对撞机 (LHC)

夸克时期

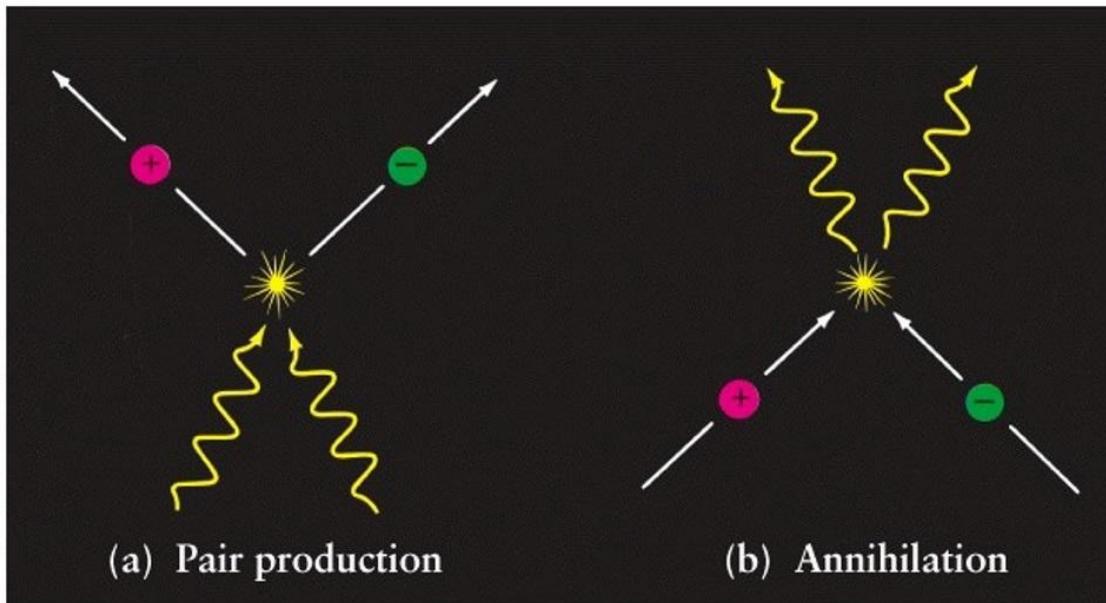
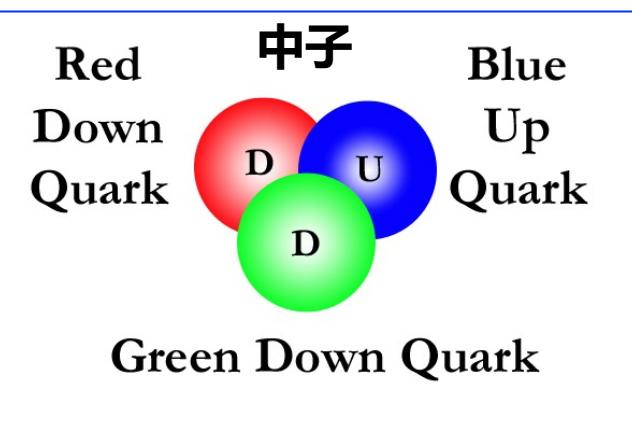
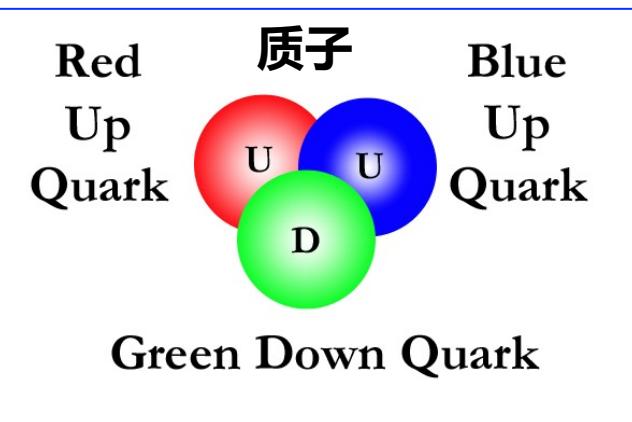
- 夸克时期 (Quark Epoch): 大爆炸后 $10^{-12} - 10^{-5}$ s

- 基本作用力的万有引力、电磁力、强作用力和弱作用力已经分离成为现在的形式
- 但温度仍然很高，不允许夸克结合在一起形成强子



强子、轻子时期

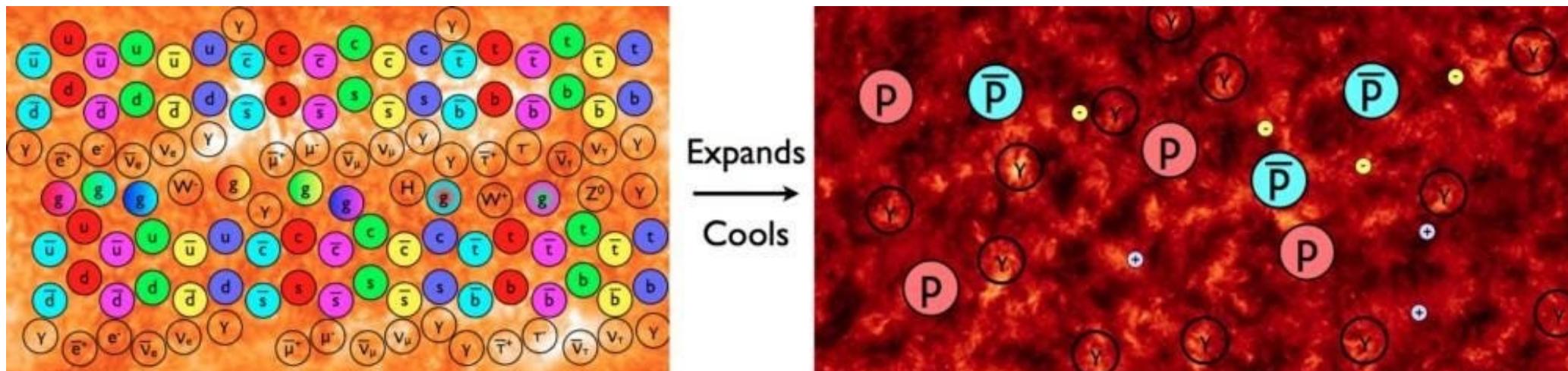
- 强子时期 (Hadron Epoch): 大爆炸后 $10^{-5} - 1$ s
 - 宇宙的温度已经降低至允许来自夸克时期形成的夸克被束缚在一起成为强子
 - 温度仍高得足以让强子和反强子对形成，物质与反物质维持着热平衡



The production of matter/antimatter pairs (a) from pure energy is a completely reversible reaction (b), with matter/antimatter annihilating back to pure energy. This creation-and-annihilation process, which obeys $E = mc^2$, is the only known way to create and destroy matter or antimatter. At low energies, particle-antiparticle creation is suppressed.

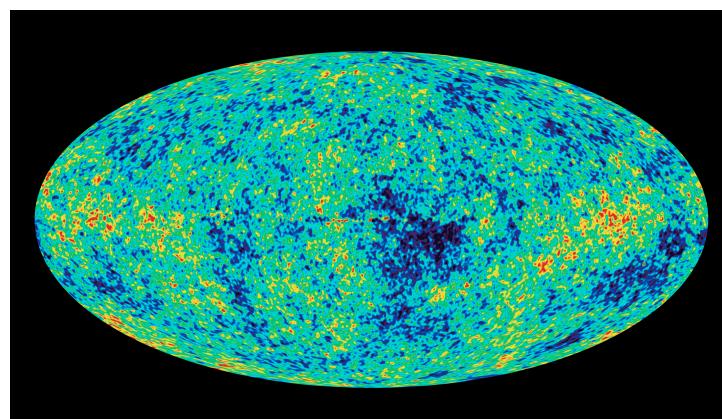
强子、轻子时期

- 强子时期 (Hadron Epoch): 大爆炸后 $10^{-5} - 1$ s
 - 宇宙的温度已经降低至允许来自夸克时期形成的夸克被束缚在一起成为强子
 - 温度仍高得足以让强子和反强子对形成，物质与反物质维持着热平衡
- 轻子时期 (Lepton Epoch): 大爆炸后 $1 - 10$ s
 - 宇宙的温度仍持续下降，强子和反强子对不再能产生，大部分的强子和反强子都在湮灭的反应中消除了，只有少部分的强子留存下来
 - 宇宙温度仍然够高，足以生成轻子/反轻子对，因此轻子和反轻子对仍然维持着热平衡
 - 大约在大爆炸之后10秒钟，宇宙的温度已经降低到轻子和反轻子对不再能产生

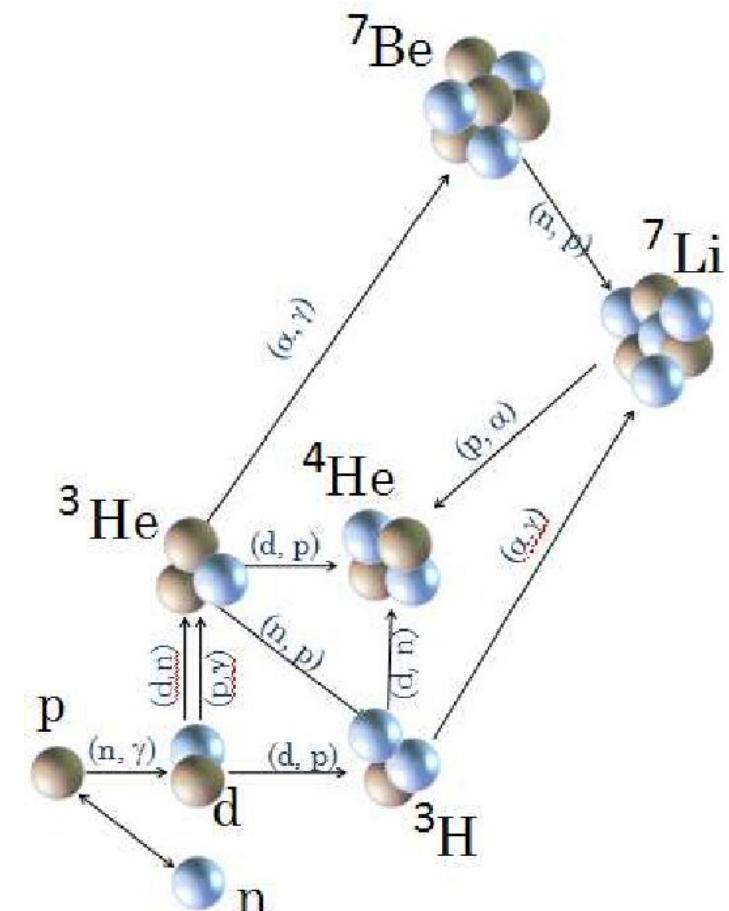


原初核合成时期与光子时期

- **核合成时期** (Big Bang nucleosynthesis): 大爆炸后 $10 - 1000\text{s}$
 - 氢 ($^1H, ^2H, ^3H$) , 氦 ($^2He, ^3He, ^4He$) , 锂 (7Li)
 - 基本上, 所有比锂重的元素都是在很久以后, 在恒星演化和爆炸中通过恒星核合成产生的
- **光子时期** (Photon Epoch): 大爆炸后 $10\text{s}-37\text{万年}$
 - 宇宙包含了由原子核、电子和光子组成热且浓密的等离子
 - 大约在大爆炸之后的38万年, 宇宙的温度下降至原子核可以和电子结合在一起, 创造出中性的**原子**
 - 这样的结果使得光子不再和物质频繁的相互作用, 宇宙开始变得**透明**, 同时产生现今观察到的**宇宙微波背景辐射** (CMB)

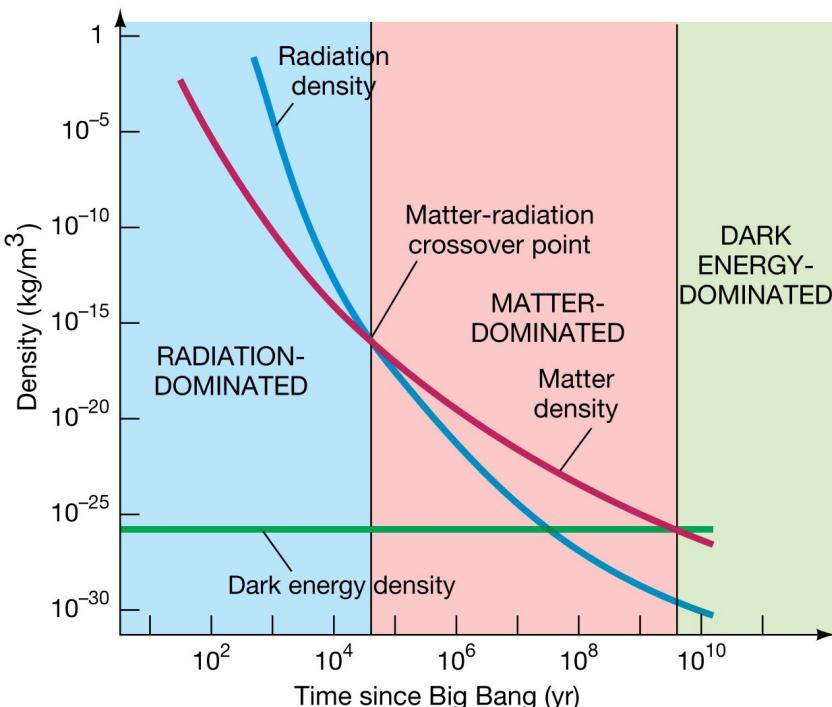


根据WMAP对宇宙微波背景辐射的观测所绘制的图像

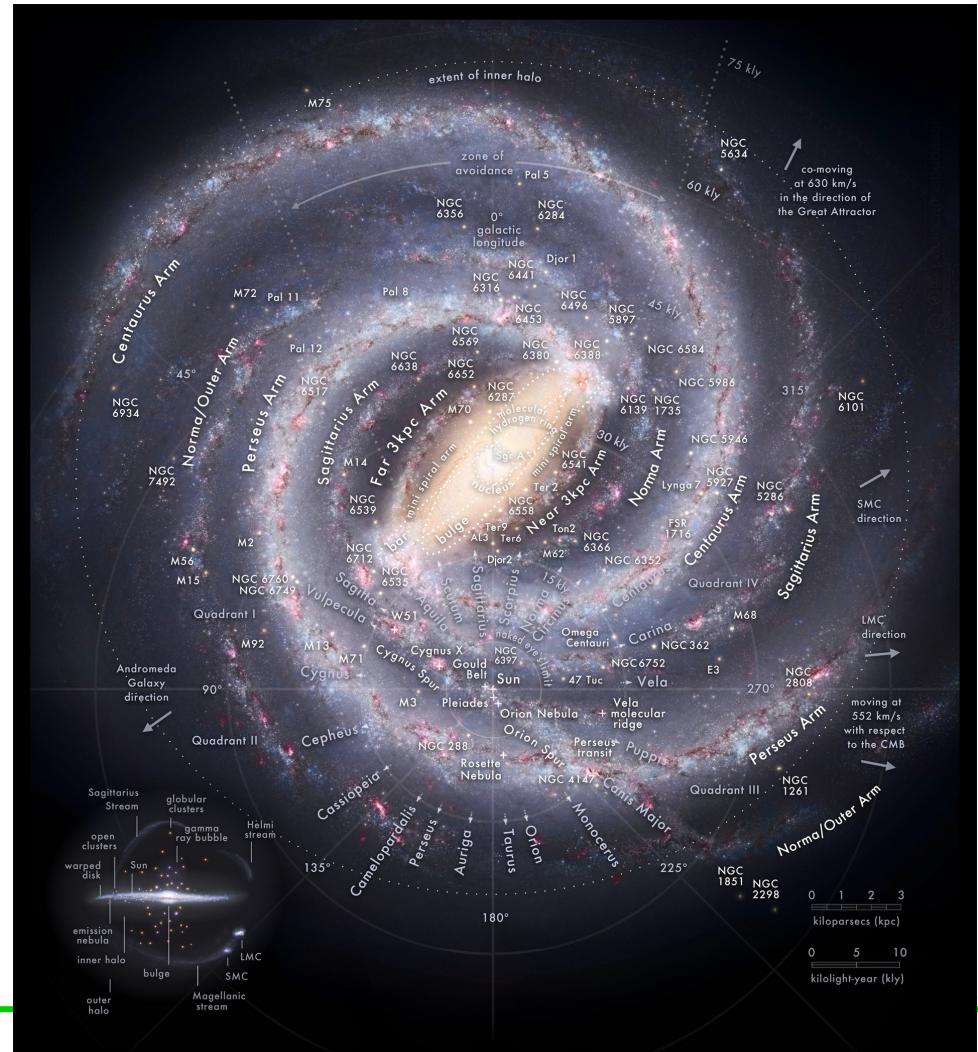


大尺度结构形成

- **物质为主时代** (Matter-dominated Era): 大爆炸后4.7万年-98亿年
 - 气体和尘埃云→原始扰动诱发局部地区气体的物质密度增加，形成星团和恒星
 - 太阳系：大爆炸后84亿年（46亿年前）



银河系：
直径：10万-18万光年
大约拥有1,000亿至4,000亿
颗恒星

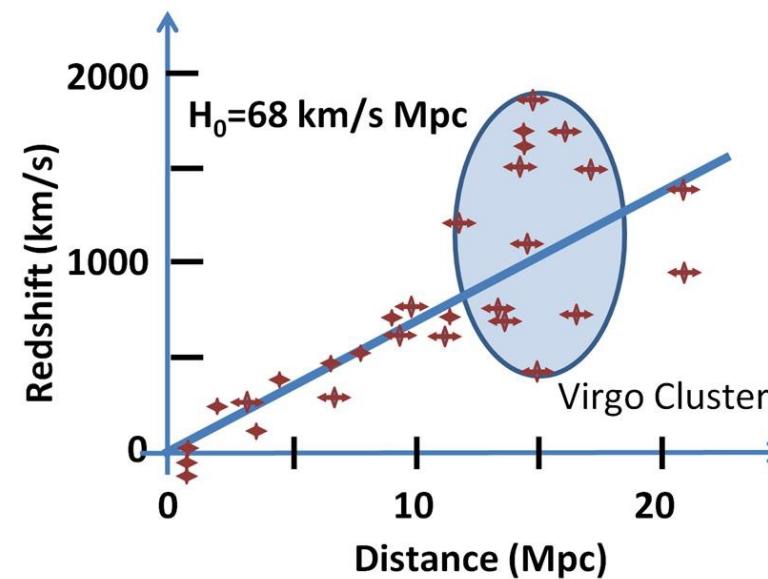
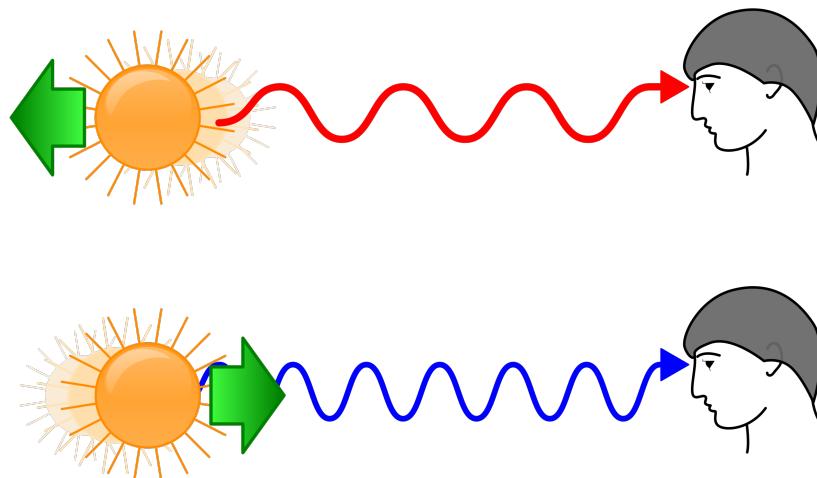


大爆炸理论的证据

- 大爆炸理论的四大支柱
 - 哈勃定律 (Hubble-Lemaître law) : 遥远星系的退行速度 v 与它们和地球的距离 D 成正比 $v = H_0 D$
 - v 是由红移现象测得的星系远离速率

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

1927年，比利时天文学家乔治·勒梅特计算出爱因斯坦场方程的一个解，发现宇宙在不断地膨胀
1929年，美国天文学家埃德温·哈勃发表其观测结果：距离银河系越远的星系退行越快



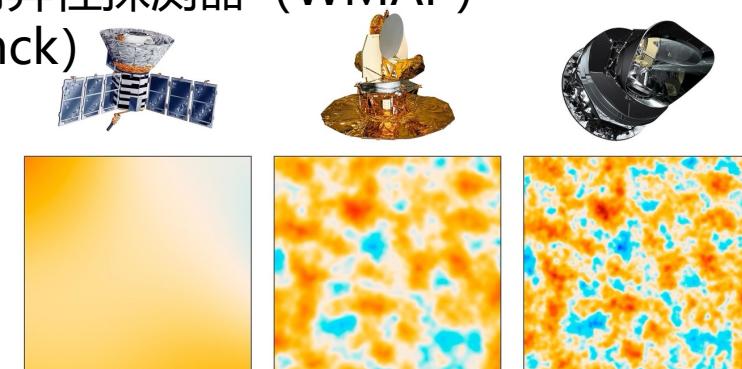
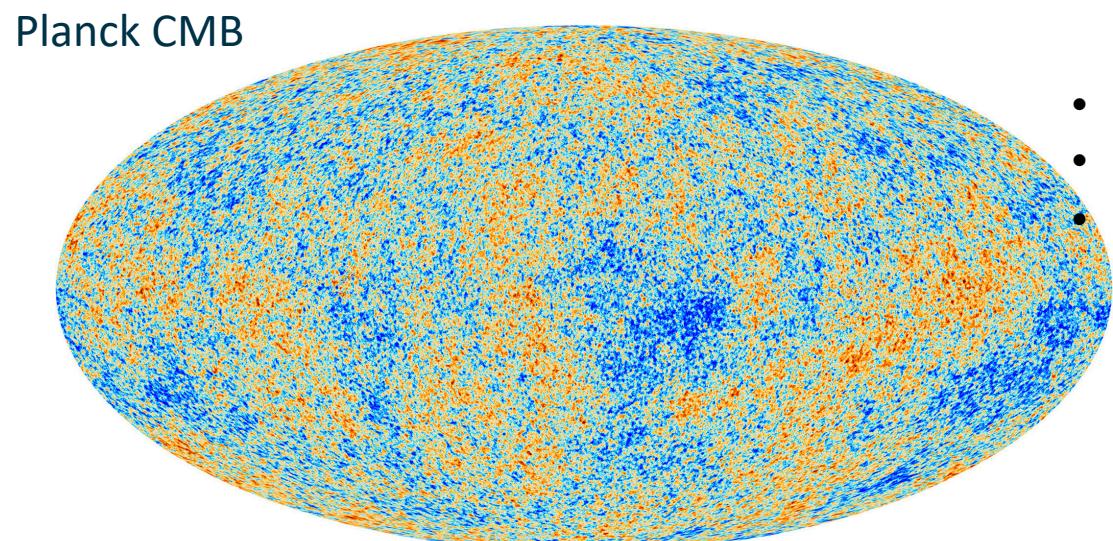
被认为是空间尺度扩展的第一个观察依据

大爆炸理论的证据

- 大爆炸理论的四大支柱

- 宇宙微波背景辐射 (Cosmic Microwave Background, CMB)

- “大爆炸” 遗留下来的热辐射，是一种充满整个宇宙的电磁辐射
 - 随着宇宙的膨胀，光子的能量因红移而降低，从而使光子落入了电磁波谱的微波频段
 - 微波背景辐射被认为在宇宙中的任何一点都可被观测，并且在各个方向上都（几乎）具有相同的能量密度
 - 1948：拉尔夫·阿尔菲、罗伯特·赫尔曼首次预测CMB，温度为5K
 - 1964：美国射电天文学家阿诺·彭齐亚斯(Arno Penzias)和罗伯特·威尔逊(Robert Wilson)偶然发现宇宙微波背景（3K），并于1978年获得诺贝尔物理奖
 - 1989：宇宙背景探测者COBE卫星，2.726K
 - 2001：威尔金森微波各向异性探测器 (WMAP)
 - 2013：普朗克卫星 (Planck)



大爆炸理论的证据

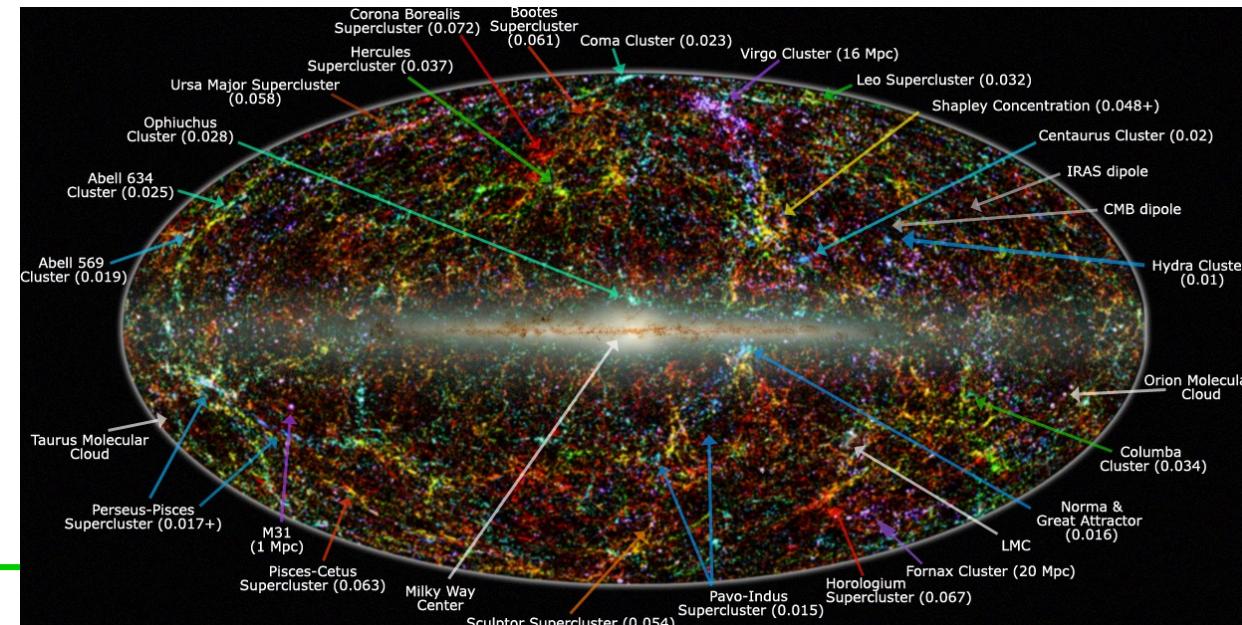
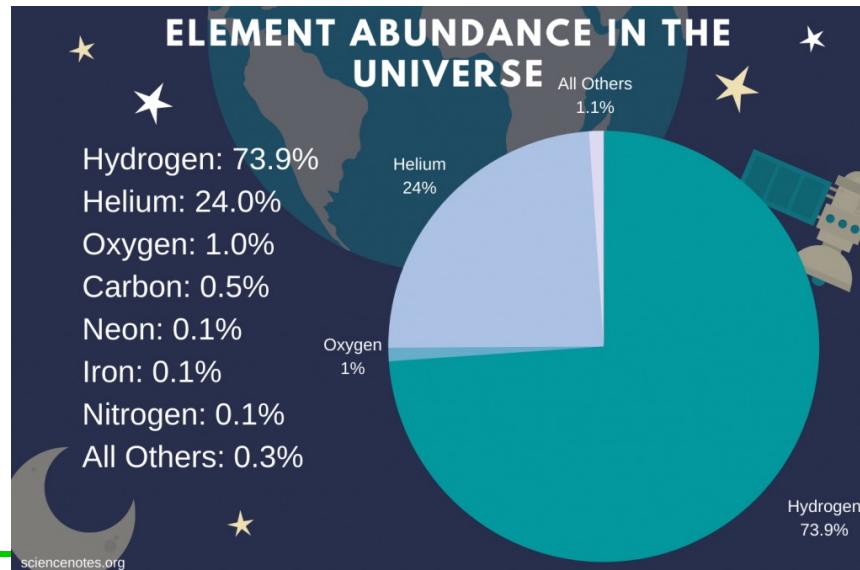
- 大爆炸理论的四大支柱

- 原始物质丰度，即原初核合成 (Big Bang nucleosynthesis, BBN)

- 大爆炸理论预测轻元素总质量占比： $^4_2He/H \sim 0.25$, $^2_1H/H \sim 10^{-3}$, $^3_2He/H \sim 10^{-4}$, $^7_3Li/H \sim 10^{-7}$
 - 大爆炸核合成理论所预言的轻元素丰度与实际观测可以认为是基本符合
 - 到目前为止还没有第二种理论能够很好地解释并给出这些轻元素的相对丰度

- 大尺度结构和星系的形成和演化

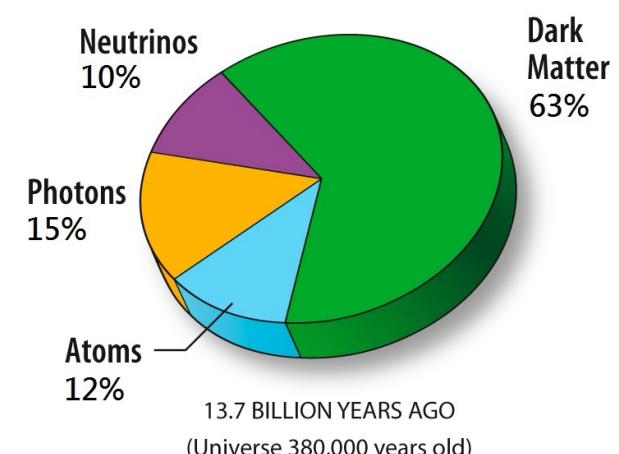
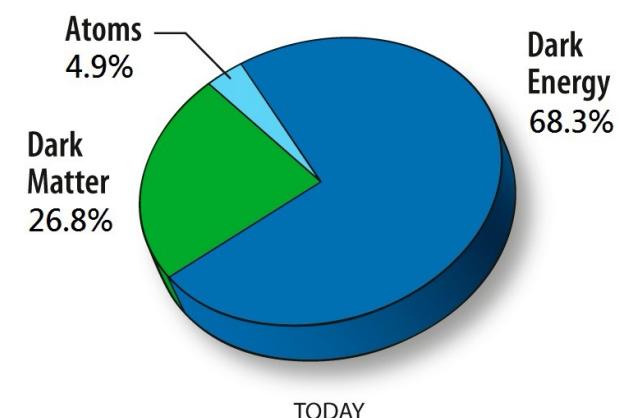
- 对星系和类星体的分类和分布的详细观测，为大爆炸理论提供了强有力的支持证据



宇宙未解之谜

- **未解决的物理学问题：**

- 宇宙暴涨理论是否正确？如果正确，暴涨时期的性质是什么？引致暴涨的假想的暴涨场到底是什么？
- 大统一理论：怎样能够将量子场论的三种不同的基本相互作用，即强相互作用、弱相互作用和电磁相互作用，统一成为单独一种相互作用？
- 暗物质是什么？
- 暗能量是什么？
- ...

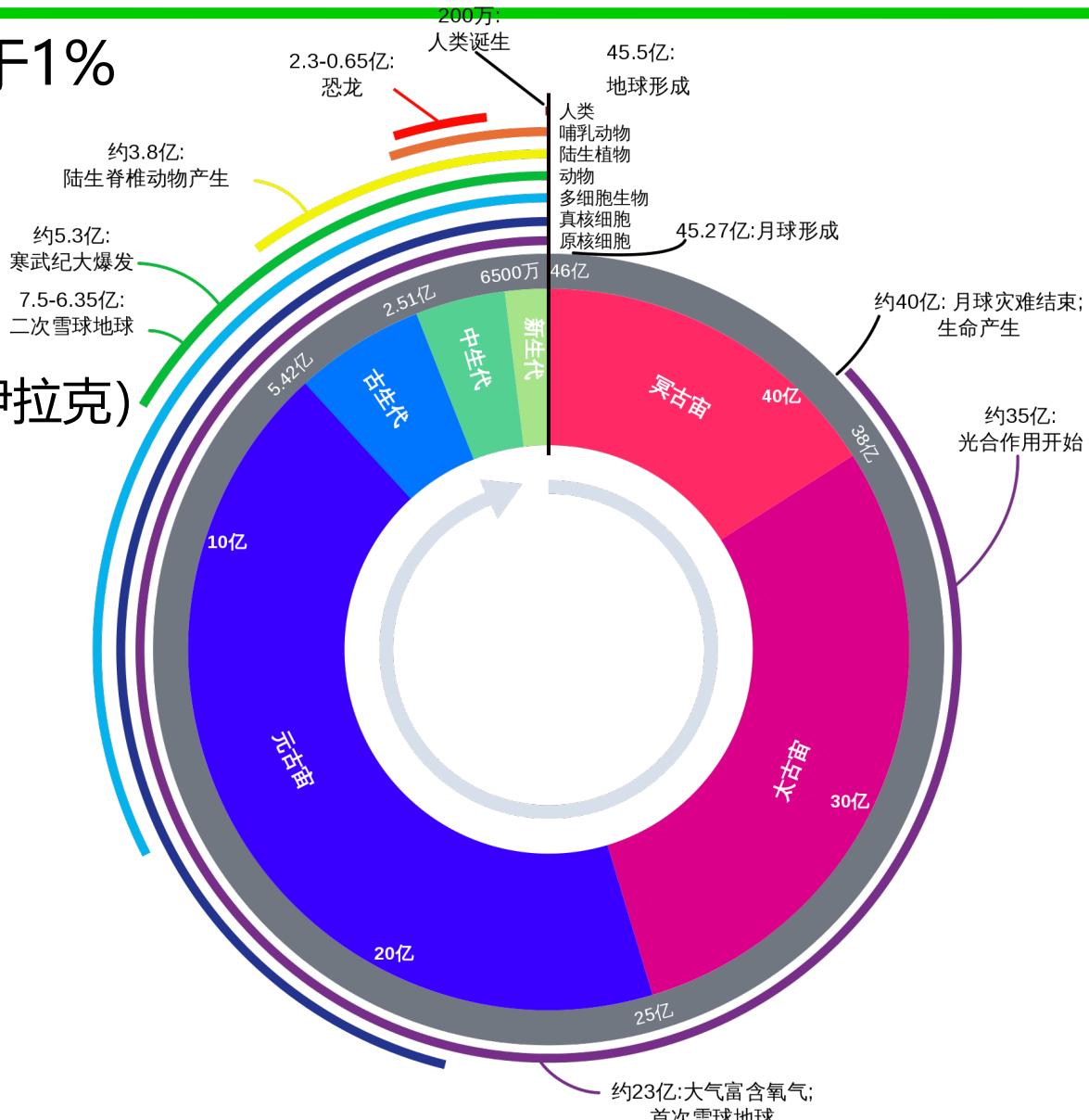


科学的起源

力学是最原始的物理学分支之一

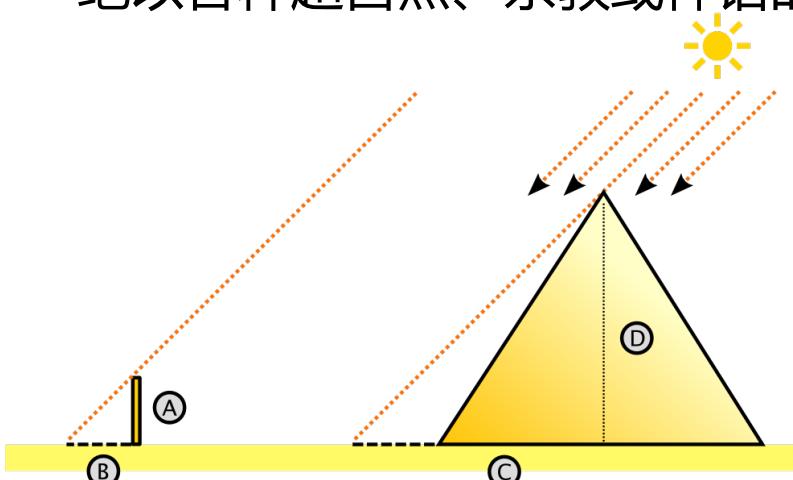
文明的诞生

- 研究显示，地球的年龄约45.4亿年，误差小于1%
- 古人类诞生于约200万年前
 - 现代人类诞生于约30万年前
- 文明的诞生
 - 公元前4000年美索不达米亚Mesopotamia (今伊拉克)
 - 古埃及、古印度、古希腊、古代中国、安第斯

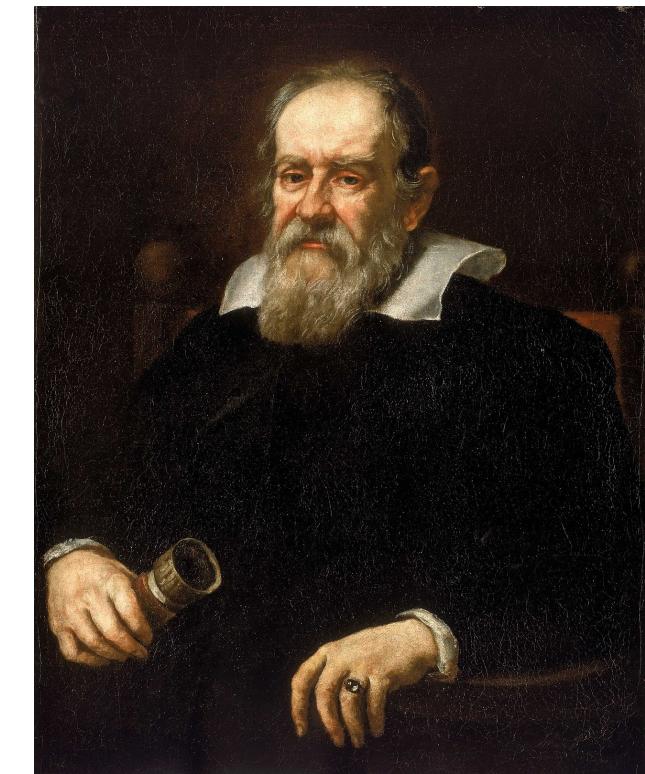


科学的起源

- 科学：自然科学(Natural science)、社会科学(Social science)、形式科学(Formal science)
 - 关于现代科学的起源，有不同的观点。一种观点认为现代科学起源于17世纪
 - 伽利略 (Galileo) 被称为“现代科学之父”（--爱因斯坦、霍金）
 - 科学萌芽于古希腊或更早时期
 - 17世纪以前，自然科学与哲学融合在一起，被称为“自然哲学”(Natural philosophy)，主要体现在对自然现象的观察和记载，并且对自然的解释往往是哲理性的
 - 前苏格拉底哲学家泰勒斯 (Thales, 626/623 – 548/545 BC)，拒绝以各种超自然、宗教或神话的方式解释自然现象，被称为科学之祖



泰勒斯从金字塔的阴影 估算出金字塔的高度



Galileo Galilei, father of modern science.

亚里士多德的物理学

- 物理学（包括天文学在内）是最早形成的自然科学
 - 最早的物理学著作是古希腊科学家[亚里士多德](#)（Aristotle, 384–322 BC）的《物理学》
- 亚里士多德
 - 和柏拉图、苏格拉底一起被誉为西方哲学的奠基者
 - 亚里士多德关于物理学的思想深刻地塑造了中世纪的学术思想，其影响力延伸到了文艺复兴时期，最终被牛顿物理学取代

亚里士多德物理学的主要理论

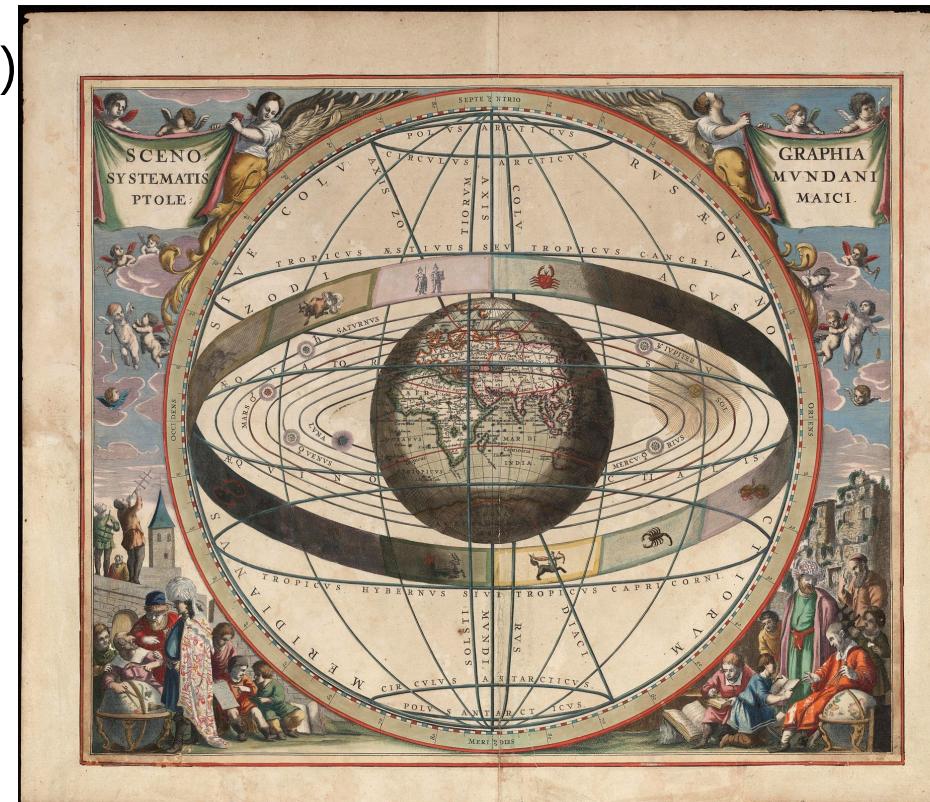
- **重力/轻率**: 为保持相对位置，物体会受到向上或向下的力。
- **直线运动**: 受到力作用物体会做匀速直线运动。
- **速度与密度的关系**: 速度与介质的密度成反比。
- **真空不存在**: 物体在真空中的速度无穷快。
- **以太普遍存在**: 空间中所有点都充满这种物质。
- **无限宇宙**: 宇宙空间没有边界。
- **连续介质理论**: 原子间是真空的，因此物质不可能是原子构成的。
- **精质**: 地球上方的物体不是由地球物质形成的。
- **永恒宇宙**: 太阳/行星都是正球体，并且不会改变。
- **圆周运动**: 行星沿正圆形轨道运行。

亚里士多德的观点从归纳日常生活出发，加上哲学思维，后来发展为经院哲学，成为自然科学的障碍

地心说

- 地心说 (Geocentric model) 认为地球是宇宙的中心，而其他的日月星辰都环绕着地球而运行
 - 在公元前4世纪，古希腊的数学家尤得塞斯已想到一个以地球为中心、各个星体以多层同心球的方式环绕地球的宇宙体系
 - 尤得塞斯的同心球学说被亚里士多德编入了他的宇宙观中
 - 公元2世纪，天文学家托勒密 (Ptolemaeus, 100 -170 AD) 将地心说的模型发展完善
 - 托勒密的理论能初步的解释从地球上所看到的现象，并在欧洲被普遍接受，直到16世纪

托勒密的宇宙体系图



阿基米德

- 阿基米德 (Archimedes, 287 – 212 BC) , 古希腊的数学家、物理学家、发明家、工程师、天文学家
 - 对数学和物理学的影响极为深远，被视为古希腊最杰出的科学家，“物理学之父”

- 用数学方法证明了杠杠原理
- 浮力定理
- 重心的概念和求法
- 计算了圆周率 π 的数值： $\frac{223}{71} < \pi < \frac{22}{7}$
- 发明了滑轮组

"Give me a place to stand on, and I will move the Earth"

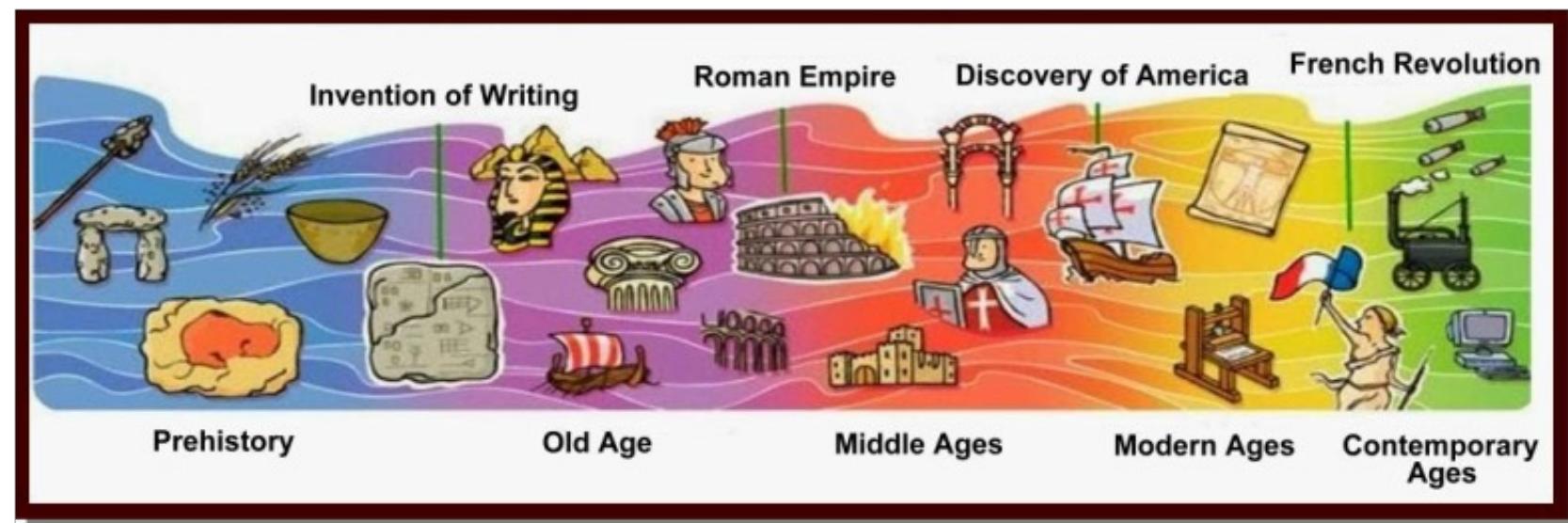


牛顿力学的诞生

牛顿力学的地位和意义

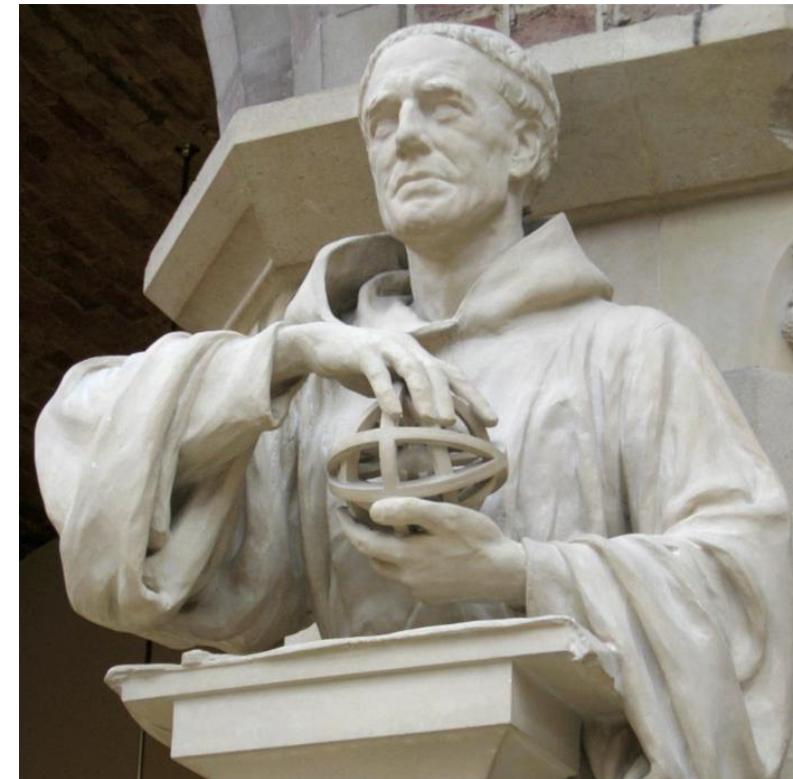
中世纪的物理学

- 古罗马时期 (753 BC–476 AD) 在自然科学方面无重大创新
 - 他们征服地中海沿岸广大地区，接触到许多文明古国的优秀成果，在科学成就进行总结方面有所贡献
- 受宗教思想的压制，西欧的科学一直到12到13世纪的中世纪大学发展才有所转变
 - the University of Bologna (1088), University of Paris (c. 1150), University of Oxford (1167), University of Cambridge (1209) ...
 - 中世纪 (Middle Ages, 公元476年 - 公元1453年) 是欧洲历史三大传统划分（“古典时代”、“中世纪”和“近现代”）的一个中间时期，始于西罗马帝国（公元476年）的灭亡，终于东罗马帝国（公元1453年）的灭亡，最终融入文艺复兴运动和探索时代（大航海时代）中



罗吉尔·培根

- 罗吉尔·培根 (Roger Bacon, 1214年—1294年)
 - 英国方济各会修士、哲学家、炼金术士
 - 提倡经验主义，主张通过实验获得知识
 - 倡导实验方法研究自然：是当时唯一旗帜鲜明地主张科学实验的人
 - 重视对数学的研究：实验方法和数学方法相结合，是近代物理学产生的重要支柱
- 培根对同时代权威的批评态度，对大学教育改革的呼唤，以及对数学、经验科学的强调让他备受称颂。
- “培根著作包含的知识远超他的时代。他对实验重要性的推崇，连同他的思想都与那个时代的基调相异。很难想象这样一位人物是如何存在于那个时代的。”
- 培根的实验科学的思想，对于文艺复兴时期的近代科学革命起到了极大的推动



牛津大学自然历史博物馆中的罗吉尔·培根像

尼古拉·哥白尼

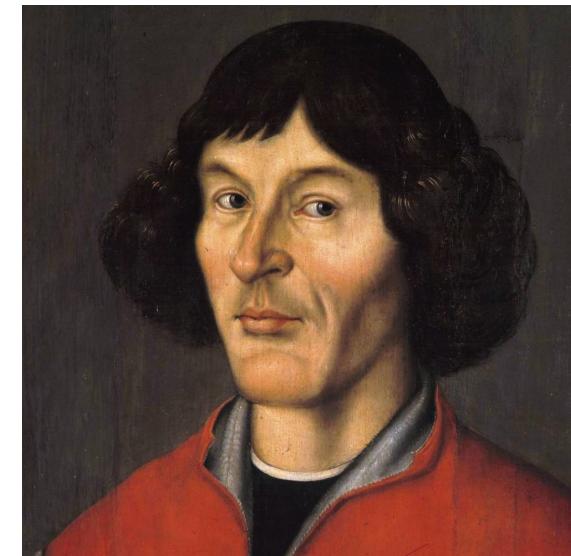
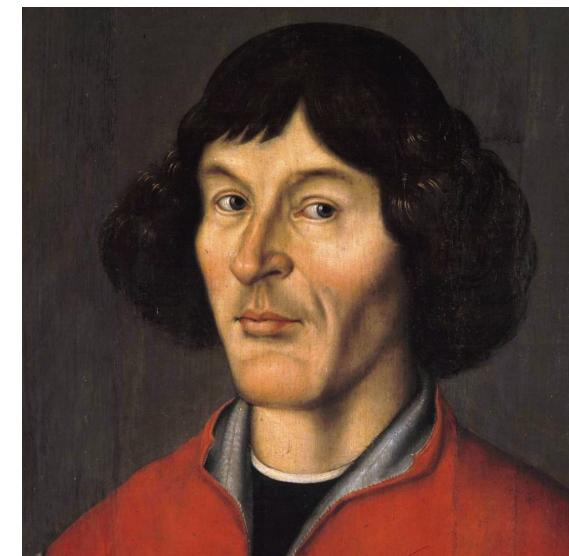
- **尼古拉·哥白尼** (Nicolaus Copernicus, 1473-1543)

- 文艺复兴时期的波兰数学家、天文学家
- 提倡**日心说**，1543年哥白尼临终前发表了《天体运行论》，一般认为该著作是现代天文学的起步点。它开启了哥白尼革命，并对推动科学革命有相当大的贡献

日心说沉重地打击了早从亚里士多德之前就已开始被天主教会接受的宇宙观，使天文学从陈旧科学观和宗教错误神学的束缚下解放出来，自然科学从此获得了新生

“日心说”是第一次科学革命开端的代表，标志着近代科学的诞生，是自然科学发展史上的一个重要的里程碑

事实上，直到1609年伽利略听闻且自己制作了天文望远镜，并以此发现了一些可以支持日心说的新的天文现象后，日心说才开始引起人们关注



伽利略·伽利莱

- 伽利略·伽利莱 (Galileo Galilei, 1564-1642)

- 被誉为“现代观测天文学之父”、“现代物理学之父”、“科学方法之父”、“科学之父”及“现代科学之父”
- 史蒂芬·霍金说“自然科学的诞生要归功于伽利略”
- 《论运动》1590
- 《力学》1600
- 《星际信使》1610，第一部利用望远镜进行观测的科学著作
- 《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》1632
- 《论两种新科学及其数学演化》1638（这两个新科学今天被叫做运动学和材料力学）
- 第一次把严密的逻辑推理、严格的数学论证和精密的实验测量结合在一起，使物理学成为真正科学
- 伽利略的研究结果对牛顿提出、完善牛顿运动定律中的第一、第二定律有一定的启示



艾萨克·牛顿

- 艾萨克·牛顿爵士 (Sir Isaac Newton, 1643-1727)

- 《自然哲学的数学原理》(1687)，阐述了万有引力和三大运动定律，由此奠定现代物理学和天文学，并为现代工程学打下了基础
- 第一次实现了天体、地上、人间物体运动的统一；为太阳中心学说提供了强而有力的理论支持，是科学革命的一大代表
- 《光学》(1704)
- 在数学上，与莱布尼茨分享了发展出微积分学的荣誉



牛顿力学的地位和意义

- 爱因斯坦对牛顿力学的评价

“无疑，古代希腊伟大的唯物论者坚持主张：一切物质事件都应当归结为一系列完全有规律的原子运动，而不允许把任何生物的意志作为独立的原因。而且无疑笛卡儿按他自己的方式重新探索过这个问题，但在当时它始终不过是一个大胆的奢望，一个哲学学派的成问题的理想而已。在牛顿以前，还没有什么实际的结果来支持那种认为物理因果关系有完整链条的信念。”

1927年为纪念牛顿逝世二百周年而写的文章

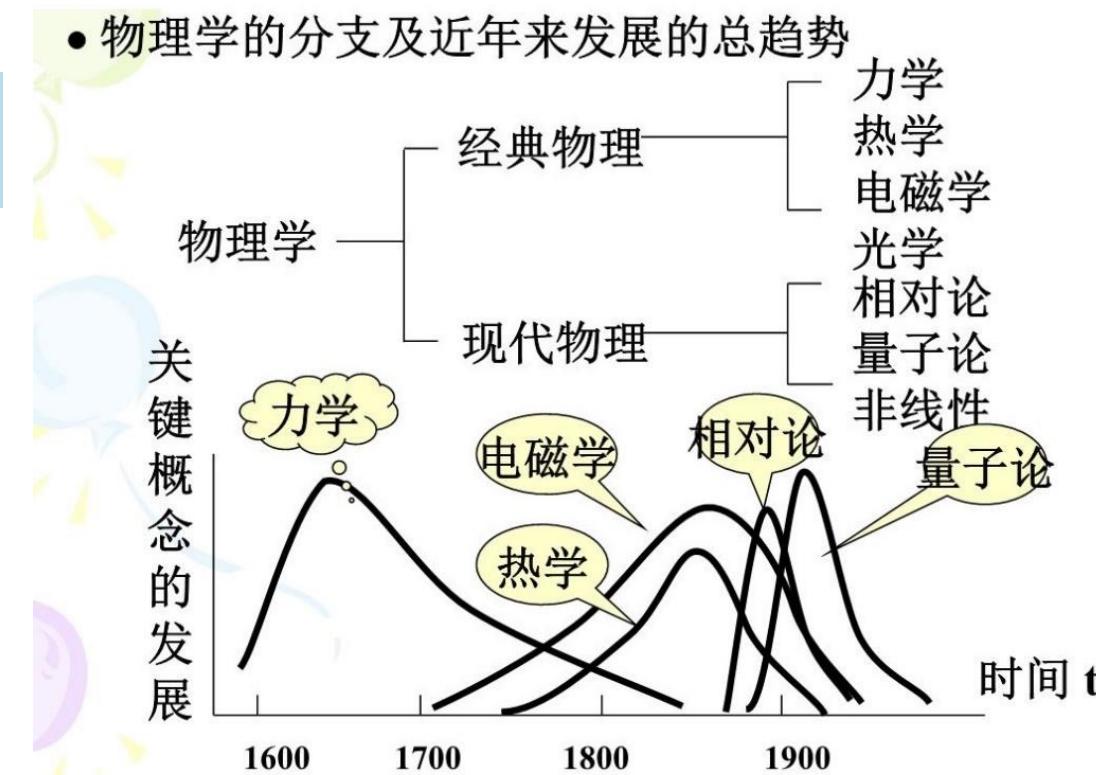
- 物理学依赖于一种基本的信息，物理世界存在完整的因果链条，即自然界是统一的，牛顿力学则是体现这种信息的第一个成功范例

牛顿力学：自然界第一个统一的范例

自然界的运动是多种多样的，牛顿指出物理学的责任就是理解支配这些运动的力。因此几乎所有的基本物理理论都称之为“某某力学”：牛顿力学、电动力学、统计力学、量子力学、量子电动力学、量子色动力学，等等。每一种新的力学的确定，都标志着我们在追求统一的途径上达到了一个新的水平。

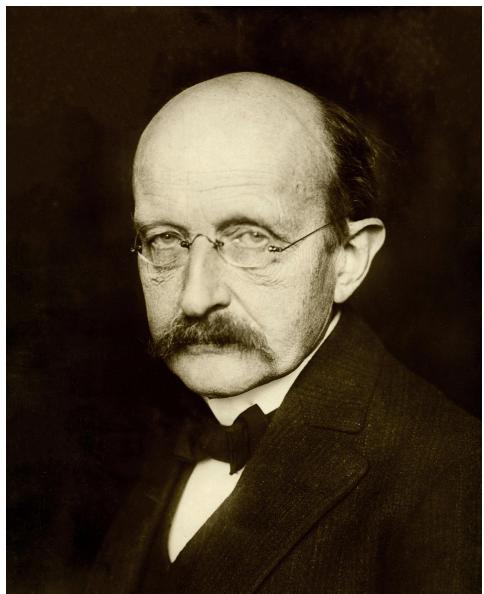
经典物理学

- 17世纪后，物理学、数学、化学、生物学逐渐分化和扩散
- 经典物理学的建立
 - 经典物理学的盛期开始于16世纪的第一次科学革命，终止于19世纪末

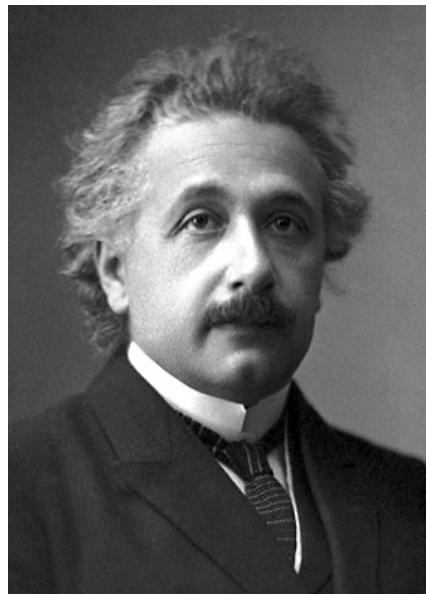


现代物理学

- 现代物理学诞生的标志：量子力学、狭义相对论



Max Planck
(1858–1947),
founder of quantum theory



Albert Einstein
(1879–1955),
founder of the theory
of relativity

1900年普朗克在黑体辐射研究中的提出能量量子化的假说

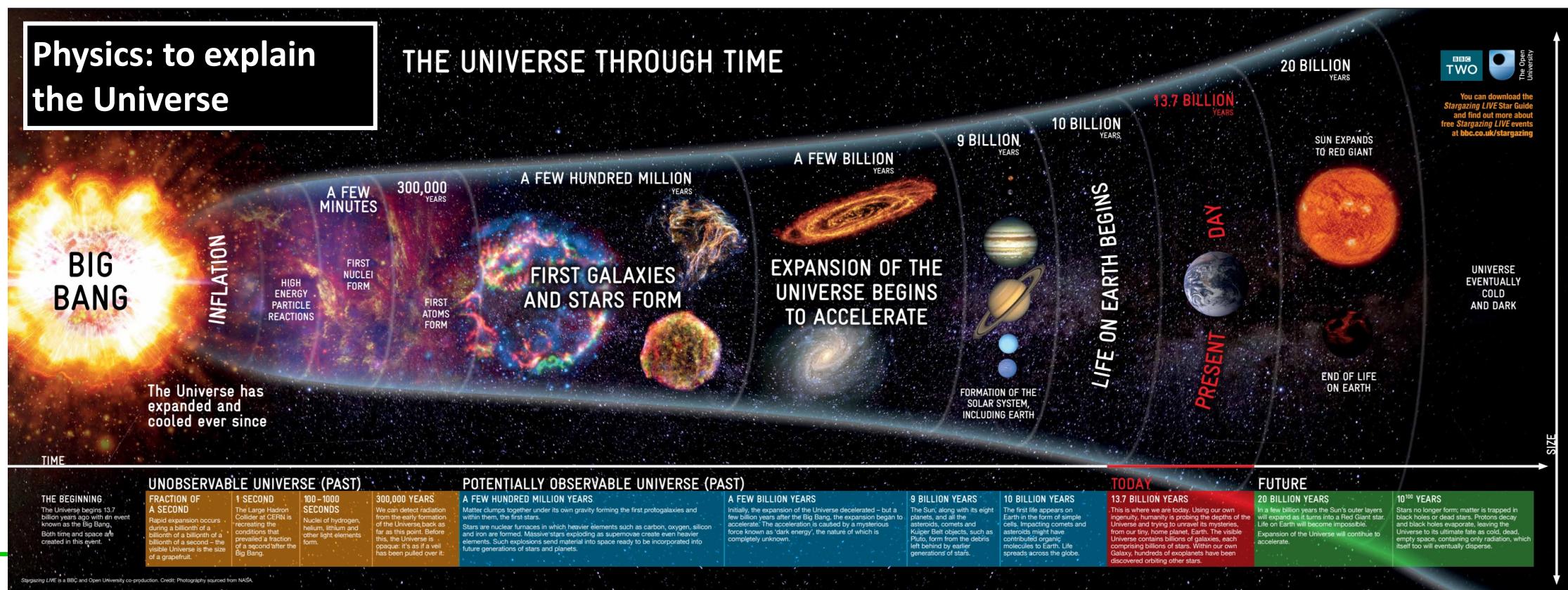
1905年9月26日，爱因斯坦发表了被称为“奇迹年论文”的论文，论文的内容就是今日我们所称的狭义相对论



1927年索尔维会议 (Conseils Solvay)

What is Physics?

- Physics comes from the Greek word “**Physis**” which means “nature”
- **It is the science of matter, its motion, as well as space and time**
- Physics can be thought of as humanity’s attempts to describe and explain our universe



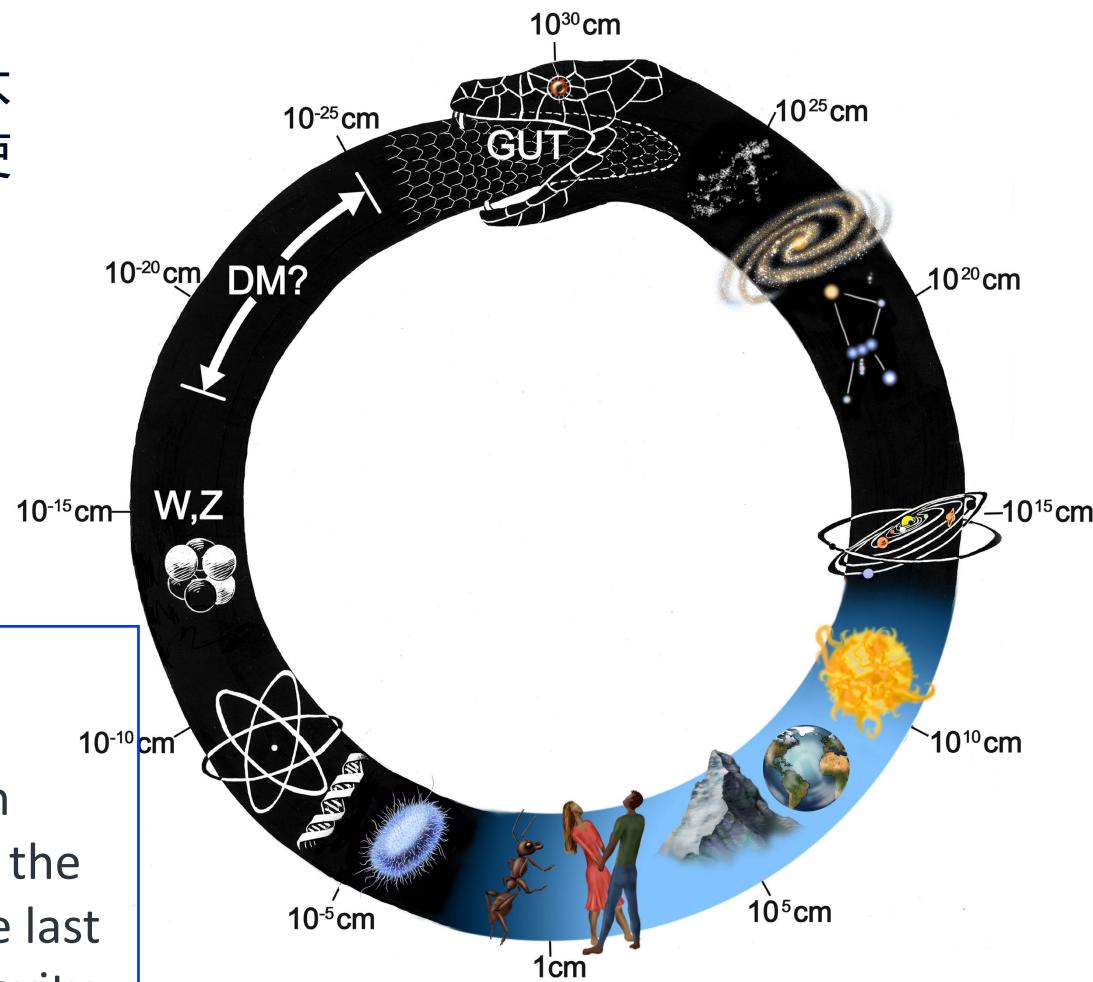
物理学的总目标

- 物理学研究的对象：自然界
 - 物理学是一门基础自然科学，它所研究的是物质的基本结构、最普遍的相互作用，最一般的运动规律以及所使用的实验手段和思维方法
- 总原则：自然界的**统一•和谐•简单•美**
- 物理学的统一
 - 力（相互作用）的统一
 - 物质世界的统一

Einstein's quest for a unified theory

After having become famous for several brilliant breakthroughs in physics, including Brownian motion, the photoelectric effect, and the special and general theories of relativity, Albert Einstein spent the last thirty years of his life on a fruitless quest for a way to combine gravity and electromagnetism into a single elegant theory.

<https://www.aps.org/publications/apsnews/200512/history.cfm>



《力学》

力学

• 力学

- 什么是力?

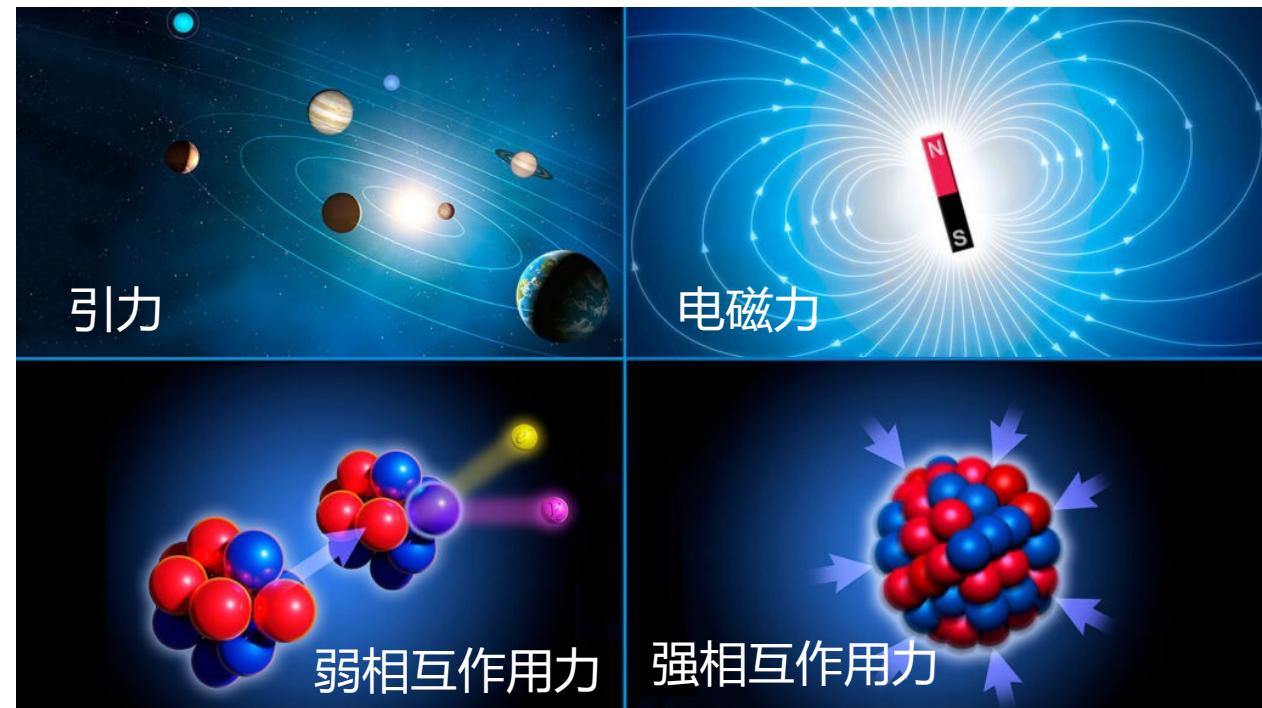
- 物体之间的相互作用

- 研究自然界物体之间的相互作用，及其与物体运动状态变化之间的关系

自然界的四大基本相互作用：

- 引力相互作用 (Gravity)
- 电磁相互作用 (Electromagnetism)
- 强相互作用 (Strong Interaction)
- 弱相互作用 (Weak Interaction)

*Mechanics is the area of physics concerned with the **relationships** between **force**, **matter**, and **motion** among physical objects.*



力学

- 力学

- 什么是力?

- 物体之间的相互作用

- 研究自然界物体之间的相互作用，及其与物体运动状态变化之间的关系

自然界的四大基本相互作用：

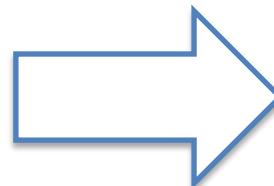
- 引力相互作用 (Gravity)
- 电磁相互作用 (Electromagnetism)
- 强相互作用 (Strong Interaction)
- 弱相互作用 (Weak Interaction)

物体体系 (Physical objects) :

- 宏观、微观
- 粒子、生物、天体
- 固态、液态、气态

- 力学是很多学科的基石

*Mechanics is the area of physics concerned with the **relationships** between **force**, **matter**, and **motion** among physical objects.*



基本物理理论：

- 牛顿力学
- 天体力学
- 生物力学
- 统计力学
- 电动力学
- 量子力学
- . . . 等等

经典力学

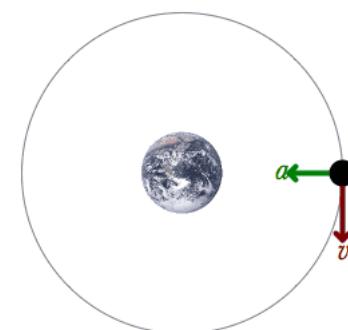
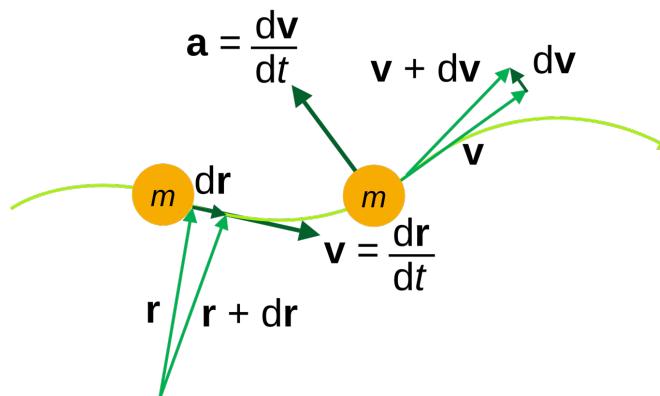
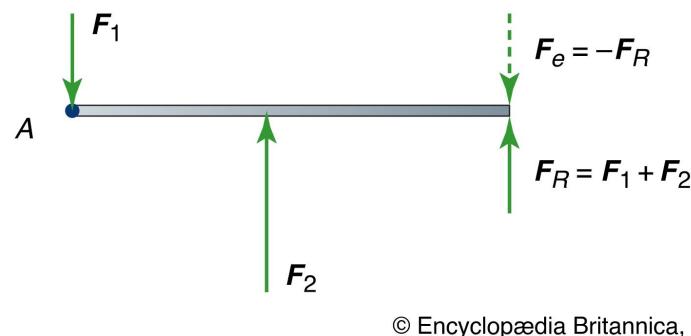
- 在各种形式的物质运动中，最简单的一种是物体位置随时间的运动
- 机械运动：宏观物体之间的相对位置变动
- 经典力学
 - 研究对象为机械运动
 - 以牛顿运动定律为基础，在宏观世界和低速状态下，研究物体运动的基本学科
 - 或者定义为 non-quantum mechanics，以包含狭义相对论

经典力学

- 研究对象分类

- 静力学 (Statics) : 描述静止物体
- 运动学 (Kinematics) :
 - 怎么运动? 描述物体运动, 即物体在空间的位置随时间的演进而作的改变
- 动力学 (Kinetics) : 为什么这样运动? 描述物体受力作用下的运动

} Dynamics



经典力学

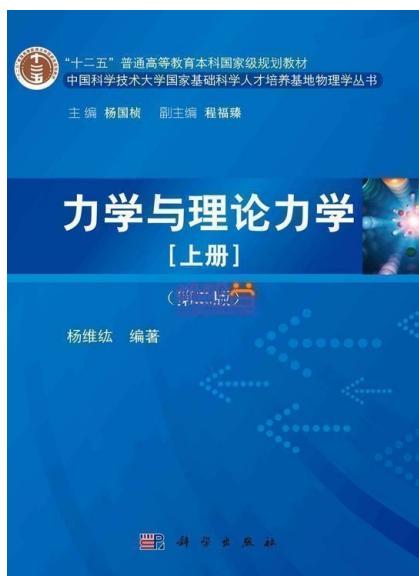
• 理论框架分类

经典力学类型	创立时间	类型	对应的空间	相应的几何	方程类型
牛顿力学	1687 年	矢量力学	欧氏空间	欧氏几何	二阶微分方程
拉格朗日力学	1788 年	分析力学	位形空间	黎曼几何	s 个二阶微分方程组
哈密顿力学	1834~1835 年	分析力学	相空间	辛几何	$2s$ 个一阶微分方程组

注: s 为自由度个数.

赵亚溥《力学讲义》

• 牛顿力学vs分析力学



◆ AI 概览

直接学习分析力学而不先学牛顿力学是困难的，因为牛顿力学提供了一个直观、因果明确的框架，是理解和构建更抽象的分析力学的坚实基础。分析力学虽然能更有效地解决复杂问题，但它在概念上更抽象，需要先掌握牛顿力学的基本原理才能更好地理解。

牛顿力学的基础作用

直观的物理概念：

牛顿力学基于物体受力后的运动改变，这是一种非常直观的概念，能够帮助初学者快速理解力、质量和加速度之间的关系。

历史演进的必然性：

牛顿力学是第一个系统阐述因果关系框架的理论，为物理学发展奠定了基石，分析力学是在牛顿力学的基础上发展起来的。

解决复杂问题的工具：

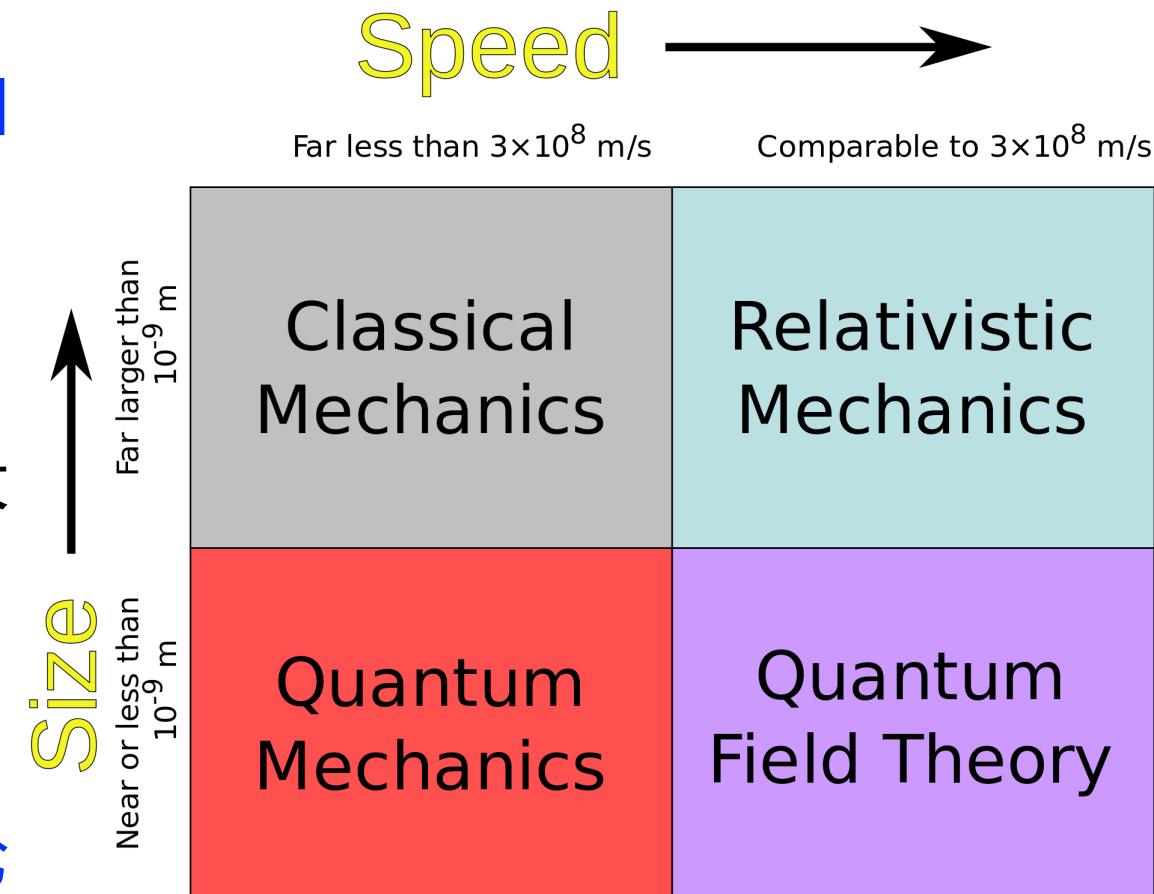
牛顿力学提供了强大的数学工具来解决实际问题，例如建造摩天大楼或计算火箭轨道，为后续更复杂理论的学习打下基础。

经典力学的局限性

- 牛顿的绝对时空观
 - 牛顿的理论体系是建立在他的绝对时间和绝对空间的假设之上的
 - 绝对的、真正的和数学的时间自身在流逝着，而且由于其本性而在均匀地、与任何外界事物无关地流逝着。
 - 绝对空间，就其本性而言，是与外界任何事物无关而永远是相同的和不动的。
——牛顿，《自然哲学的数学原理》
- 在研究速度不接近光速、质量不是非常大的宏观物体时，经典力学提供了非常精确的结果
 - 实验是检验物理理论的唯一标准

经典力学的局限性

- 不能太快
 - 描述物体速度接近光速时，需要引入狭义相对论
- 不能太小
 - 当被检测的对象尺度具有大约原子直径的大小时，需要引入量子力学
- 不能太大
 - 如果研究大质量对象，需要引入广义相对论



为什么要学力学

- 为什么会有这个问题?

- 1. 高中已经学过了
- 2. 跟我想要学的专业有什么关系?
- 3.

知乎

从相对论我们知道牛顿力学是错的，可为什么现在学校大学以下还只教经典力学呢？就因为“真理”太难学吗？

真不是我讽刺什么，我尊重每一位科学家，只不过我认为牛顿的力学好像是通过观测宏观世界的运动并进行测量，然后再给观测到的运动轨迹用数学知识写一个描述它的函数，并不是通过物理理论推导的方式完成的理论构建。而且他这种方法无法延伸到大到宇宙时空领域，或小到量子领域，也只限于能粗略“精准”地观测到的我们眼前的世界。所以我认为像爱因斯坦和普朗克这些理论推导出的结论一旦正确就牢不可破，牛顿的不过是在“数学课上对一段段运动写函数”。

[link](#)

There once was a classical theory,
Of which quantum disciples were leery.
They said, “Why spend so long
On a theory that’s wrong?”
Well, it works for your everyday query!

-- David Morin

Take-home messages:

- 物理学是以实验为基础的
- 物理理论有相对应的适用范围（时空）

为什么要学力学

- 换一种问法：力学要学习什么？
- “知识点” 其实不多，关键在于系统性的学习

第一部分：时间•空间与运动

- ❖ 时间•空间与运动
- ❖ 运动的起源

第三部分：连续介质体系运动规律与对称性

- ❖ 刚体的运动规律与对称性
- ❖ 时间的周期性运动---振动力学
- ❖ 空间的周期性运动---波动力学
- ❖ 流体力学

第二部分：时空对称性与守恒律

- ❖ 空间均匀性与动量
- ❖ 时间均匀性与能量
- ❖ 空间各向同性与角动量
- ❖ 引力场中物体的运动规律

第四部分：时空结构

- ❖ 狭义相对论的时空结构
- ❖ 广义相对论的时空结构

为什么要学力学

- 换一种问法：力学要学习什么？
- “知识点” 其实不多，关键在于系统性的学习
- 分析问题、解决问题的方法/能力
 - 建立模型
 - 合理近似、忽略次要因素（高阶小量）
- 物理图像/直觉（Physics Intuition）
 - 数学与物理的关系
 - 已有经验、简单的数学模型与复杂的物理现象之间建立关系（归纳、演绎、类比）
- 为后续物理或相关课程做铺垫
 - 物理概念
 - 数学工具和技巧

如何学习力学

- 力学之“难”

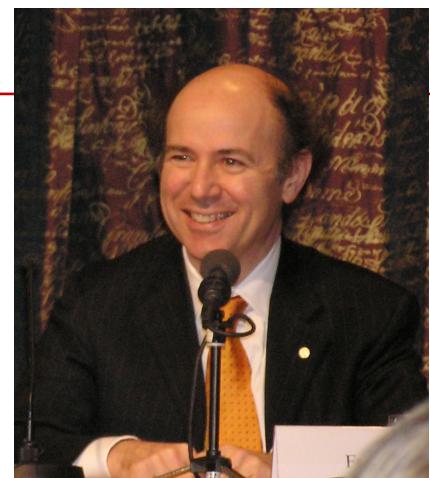
- 有些概念比较模糊

Whence the Force of $F = ma$?

[Physics Today 57, 10, 11 \(2004\)](#),

Frank Wilczek, 2004 Nobel
Laureate

When I was a student, the subject that gave me the most trouble was classical mechanics. That always struck me as peculiar, because I had no trouble learning more advanced subjects, which were supposed to be harder. Now I think I've figured it out. It was a case of culture shock. Coming from mathematics, I was expecting an algorithm. Instead I encountered something quite different—a sort of culture, in fact.



- 内容很多，节奏比中学物理课快很多

- → 主动学习
 - → 讨论和适当做习题对学习物理至关重要

- 数学之“困”

- 力学要用到的单变量和多变量微积分多数同学都还没有学 → 暂且接受，回头再领悟

如何学习力学

- 培育物理思维
 - 精力放在那些更为复杂的公式上是要不得的，而应该注重对新概念的理解、体会这个物理概念是如何提出的
- 理论与实验相结合
 - 大物实验、生活和自然中的力学现象

- Physics involves a great deal of problem solving.
- Whether you are doing cutting-edge research or reading a book on a well-known subject, you are going to need to solve some problems.
- In the latter case (the presently relevant one, given what is in your hand right now), it is fairly safe to say that **the true test of understanding something is the ability to solve problems on it.**

-- David Morin

Strategies for solving problems

This book grew out of Harvard University's honors freshman mechanics course.

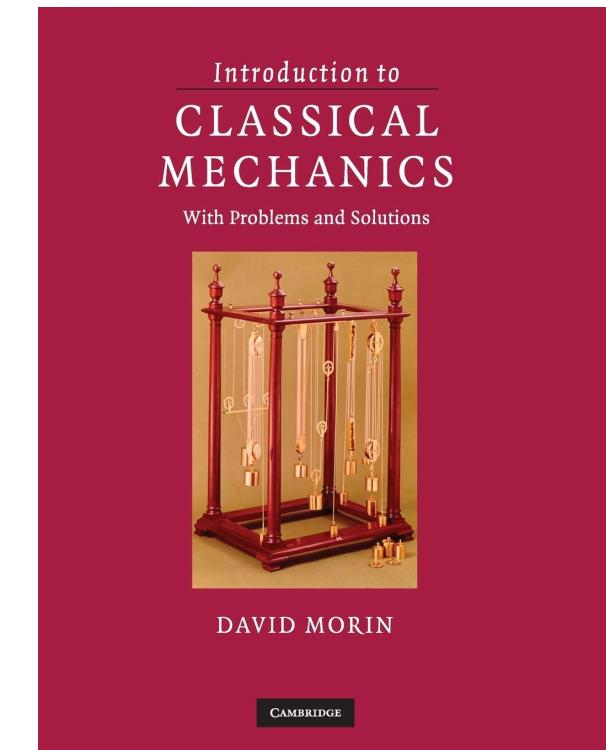
Chapter 1 discusses various problem-solving strategies. **This material is extremely important, so if you read only one chapter in the book, make it this one.** You should keep these strategies on the tip of your brain as you march through the rest of the book.



David Morin

Senior Lecturer on Physics
Harvard University

Office: Jefferson Lab 258
Email: djmorin@fas.harvard.edu



1.1 General strategies

- **Draw a diagram, if appropriate.**
- **Write down what you know, and what you are trying to find.**
- **Solve things symbolically.**
- **Consider units/dimensions.**
- **Check limiting/special cases.**
- **Check order of magnitude if you end up getting a numerical answer.**

1.2 Units, dimensional analysis

1.3 Approximations, limiting cases

<https://davidmorin.physics.fas.harvard.edu/>

举例：量纲分析

[例题] 单摆。A mass m hangs from a massless string of length l and swings back and forth in the plane of the paper. The acceleration due to gravity is g . What can we say about the frequency of oscillations?

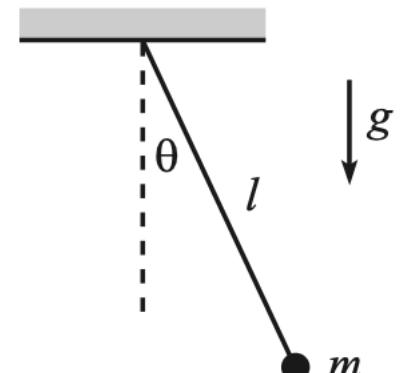
[解] 力学量的量纲：分别用 L, M, T 表示长度、质量、时间这三个基本量，则任何力学量 A （就其单位量度来说）总可以写成 L, M, T 的一定幂次的组合

题目中给定的物理量的量纲： $[m] = M, [l] = L, [g] = \frac{L}{T^2}, [\theta] = 0$

要求的频率的量纲为： $[\omega] = \frac{1}{T}$,

题目给出的已知量能给出 $\frac{1}{T}$ 量纲的组合为： $\omega = f(\theta_0) \sqrt{\frac{g}{l}}$

其中 θ_0 为 θ 的最大值， f 是无量纲的函数



量纲分析虽然不能直接给出正确答案，但肯定能告诉我们某个答案一定是错的

举例：近似和极限情况

[例题] 收尾速度问题。A beach ball is dropped from rest at height h . Assume that the drag force from the air takes the form $F_d = -m\alpha v$, where α is constant and $\alpha > 0$. We'll find that the ball's velocity and position are given by

$$v(t) = -\frac{g}{\alpha}(1 - e^{-\alpha t}), \quad y(t) = h - \frac{g}{\alpha}\left(t - \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha t})\right)$$

These expressions are a bit complicated, so for all you know, I could have made a typo in writing them down. So let's look at some limiting cases. If these limiting cases yield expected results, then we can feel a little more confident that the answers are actually correct.



[解] 考虑两种极限情况: $\alpha t \ll 1, \alpha t \gg 1$

(1) $\alpha t \ll 1$, 即 $t \ll \frac{1}{\alpha}$, 运动初始阶段, 直觉告诉我们: 此时速度很小, 可以忽略空气阻力, 看做是自由落体运动

利用泰勒展开 $e^{-x} \approx 1 - x + \frac{1}{2}x^2$

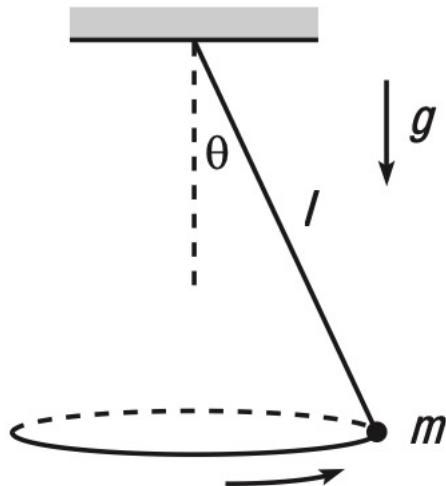
$$v(t) = -\frac{g}{\alpha}(1 - e^{-\alpha t}) \approx -\frac{g}{\alpha}\left(\alpha t - \frac{1}{2}\alpha^2 t^2\right) = -gt + \frac{1}{2}g\alpha t^2 \approx -gt$$

$$\text{同样地, } y(t) = h - \frac{g}{\alpha}\left(t - \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha t})\right) \approx h - \frac{1}{2}gt^2$$

(2) $\alpha t \gg 1$, 即 $t \gg \frac{1}{\alpha}$, 直觉告诉我们: 最终应该达到稳定状态, 重力与阻力平衡, $F_d = -m\alpha v_\infty = mg \Rightarrow v_\infty = -\frac{g}{\alpha}$
 $\alpha t \gg 1$ 时, $e^{-\alpha t} \approx 0 \Rightarrow v(t \rightarrow \infty) \equiv v_\infty = -\frac{g}{\alpha}$

思考

[习题] 圆锥摆。A mass hangs from a massless string of length l . Conditions have been set up so that the mass swings around in a horizontal circle, with the string making a constant angle θ with the vertical. What can we say about the angular frequency of this motion?



- (A) $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$
(B) $\omega = \sqrt{\frac{g}{l \cos \theta}}$
(C) $\omega = \sqrt{\frac{g}{l \sin \theta}}$

[解] 考虑极限情况

- (1) $\theta \rightarrow 0$, 圆锥摆 \rightarrow 单摆, 对于单摆 $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$
(2) $\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}$, 要保持水平, 此即圆周运动, 向心力要 $\rightarrow \infty$, 故 $\omega \rightarrow \infty$

- 物理图像更清晰
- 容易验证答案或理论预期
- 注意: 需要对无量纲的量进行近似或取极限

本课程简介

联系方式

- 主讲

- 徐来林, Tel: 63607936, lailinxu@ustc.edu.cn
- 物质科研楼A601
- 欢迎各种形式的线上线下讨论

- 助教

- 师驰昊PB23000189 sch20061107@mail.ustc.edu.cn
- 疏宇PB23000239 shuyu2023@mail.ustc.edu.cn

- QQ群:

- 679742305



课程组织、考核要求

- 课程组织
 - 上课时间：周二3-4(5), 周四1-2
 - 必要时会占用周二第5节课的部分时间
 - 每章一次随堂测试（考勤功能）
 - 每章一次讨论课（自由选题、提前报名，安排在周二第5节课）
 - 在时间不冲突时，也鼓励大家去参加其他力学课堂的讨论课
- 考核
 - 平时作业满分 20 分 + 期中考试满分 30 分 + 期末考试满分 40 分 + 平时测验满分 10 分
 - 期中考试（主讲教师自主命题）
 - 期末考试（课程组统考）
 - 讨论课上表现“不俗”（发言或提问）可获最高 15 分奖励
 - 总评成绩作为排名依据

教学大纲

- 质点力学
 - 质点运动学
 - 牛顿动力学
- 守恒律与质点系力学
 - 动量、动能（机械能）、角动量
 - 综合应用：碰撞、天体运动
- 特殊的质点系
 - 刚体、流体
- 特殊的运动形式
 - 振动、波
- 狭义相对论

Week	Contents
2	质点运动学
3	
4	牛顿动力学
5	国庆节放假
6	
7	守恒律
8	
9	
10	
11	刚体
12	
13	流体
14	振动和波
15	
16	狭义相对论
17	
18	复习
19	期末考试周
20	
Total	15 weeks
	60 class hours
	60

教学大纲

物理与工程 Vol. 21 No. 4 2011

“一个不能少”

- 知识点全覆盖
- 一个同学也不能落下

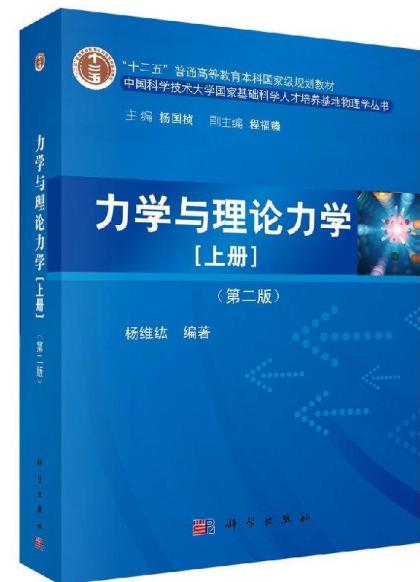
高等学校物理学本科指导性专业规范

知 识 点		基本 内 容
1-1-1	质点运动学	位置矢量、位移、速度、加速度的矢量关系及其坐标表示,相对运动等
1-1-2	惯性系下质点动力学	牛顿三定律,力学中常见的力,量纲等
1-1-3	非惯性系下质点动力学	相对性原理,非惯性系下质点动力学方程,地球表面惯性力引起的自然现象等
1-1-4	质点组动量定理与守恒	质心运动定律,质点与质点组动量定理与守恒,动量定理的应用等
1-1-5	质点组功能原理与机械能守恒定律	质点与质点组动能定理,质点组动能定理中内力功分析,质点组功能原理与机械能守恒定律,碰撞与碰撞定律等
1-1-6	质点组角动量定理与守恒定律	质点角动量定理,质点组角动量定理与守恒定律

1-3-1	中心力场	两体约化为单体,守恒定律,等效一维势,轨道微分方程,开普勒(Kepler)问题
1-3-2	刚体	刚体定轴转动运动学,刚体定轴转动动力学,刚体平面平行运动的质心运动与相对质心转动的动力学方程
1-3-3	振动	简谐振动微分方程,简谐振动的运动学方程,简谐振动的几何描述,简谐振动的合成,阻尼振动,受迫振动,微振动等
1-3-4	波动	机械波的定性描述,机械波的动力学方程,机械波的运动学方程,简谐波的运动学方程,机械波的能量与传输,多普勒(Doppler)效应等
1-3-5	流体	静流体规律,理想流动体的连续性方程与伯努利(Bernoulli)方程,伯努利方程的应用,粘滞流体的粘滞定律与斯托克斯(Stokes)公式等
6-1-1	相对论基本原理	伽利略(Galileo)变换,迈克尔逊(Michelson)-莫雷(Morley)实验,相对性原理与光速不变原理,洛伦兹变换与速度变换
6-1-2	狭义相对论运动学	同时性的相对性,时间延缓,长度收缩,时钟同步,孪生子佯谬等
6-1-3	狭义相对论动力学	相对论中的质量、动量、力、质能关系,能量与动量关系

课程资源

- 教材：
 - 杨维纮, 《力学与理论力学》(上册, 第三版)
 - 习题取自该书
- 课程录播
 - 瀚海教学网**
中国科学技术大学在线视频平台
<https://v.ustc.edu.cn/>
- 其它参考教材
 - 《力学》郑永令, 贾起民, 方小敏, 2002第2版
 - 《力学》(物理类), 舒幼生, 2005第1版
 - An Introduction to Mechanics, Daniel Kleppner & Robert Kolenkow, 2nd edition
- 其它
 - 叶邦角老师的力学主页: <http://staff.ustc.edu.cn/~bjye/LX/LIXUE.htm>
 - MIT Classical Mechanics: <https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/>



教学目的

- 掌握基本的核心物理概念
 - 时空观（牛顿、爱因斯坦），惯性系、非惯性系、守恒律、力矩、角动量 ...
- Problem solving skills
 - 模型与抽象、假设与近似、分析问题、解决问题

“基础宽厚实”
“数理基础强”

对学生的要求

- 提前预习
- 上课认真听讲、 鼓励随时打断提问
- 认真、 独立完成作业
 - 鼓励互相讨论、 交流
- 及时梳理、 复习
 - 系统性、 厘清主线

关于习题

- 正确认识习题的目的

- 有助于梳理知识点
- Enhance your problem-solving skills(而非简单的套用公式、解题技巧)
- 20%的总评成绩

Our experience is that the principal challenge for most students is not with understanding mathematical concepts but in learning how to apply them to physical problems.

*This comes with practice and there is **no substitute** for solving challenging problems.*

Consequently, problem-solving takes high priority.

关于习题

- 避免极端
 - 题海战术
 - 眼高手低

1.1 $t = \frac{2V}{v_0} = 1h$ $x_0 = v_0 t = 60\text{cm}$ 往返了无穷多次。

1.2 $\Delta x = 3 + \frac{3}{\sqrt{2}} = 3 + \sqrt{2}$ $\Delta y = 1 + \frac{2}{\sqrt{2}} = 1 + \sqrt{2}$ $s = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = \sqrt{14 + 8\sqrt{2}}$ $\theta = \arctan \frac{\Delta y}{\Delta x} = \arctan \frac{1 + \sqrt{2}}{\sqrt{2}}$

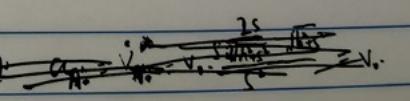
1.3 $v_0 = \frac{\Delta x_1}{\Delta t_1} = 61\text{ m/s}$ $\bar{v}_2 = \frac{\Delta x_2}{\Delta t_2} = 60.1\text{ m/s}$ $\bar{v}_3 = \frac{\Delta x_3}{\Delta t_3} = 60.01\text{ m/s}$

2) $\bar{v} = v = \dot{x}$ $\therefore v_3 = 60\text{ m/s}$ 3) $\bar{v} = \frac{x' - x}{\Delta t} = \frac{(10t + \Delta t)^2 - 10t^2}{\Delta t} = 20t + \frac{10}{\Delta t} \therefore \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{v} = 20t$

$a = \frac{v' - v}{\Delta t} = \frac{20\Delta t + \Delta t - 20t}{\Delta t} = 20$

1.25 $\because \frac{L}{v_0 \cos \theta} = t$ $v_0 \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2}gt^2 = L \tan \theta \quad \therefore \frac{1}{2}gt^2 = L \tan \theta - \tan \theta$
 $\therefore \frac{gL}{v_0^2 \cos^2 \theta} = 2(\tan \theta - \tan \theta) \quad \therefore v_0 = \sqrt{\frac{gL}{2 \cos^2 \theta (\tan \theta - \tan \theta)}}$

1.31 $V = a_f \cdot t$ $a_r = \frac{V^2}{r} = a_f^2 \cdot \frac{t^2}{r}$
1) 由图 $a_f = a_r \quad \therefore t = \sqrt{\frac{r}{a_f}} = 1s$
2) $S = \frac{1}{2} a_f \cdot t^2 = 1.5m$

1.32 $\text{if } V_{\text{eff}} = v_0 \cdot \sqrt{\frac{h^2 + s^2}{s}}$ 
2) 不会算

The problems are meant to be worked with pencil and paper. They generally require **symbolic solutions**: numerical values, if needed, come last. Only by looking at a symbolic solution can one decide if an answer is reasonable.
Diagrams are helpful.

关于习题

由图可知，此时球碰撞时小球受力分析，以水平方向为x轴正向，竖直向上为y轴正向，令 $\omega = \omega_0$ （设为顺时针向）

设 \vec{N}_c 为小球与转台的相互作用力，且此时 \vec{N}_c 满足运动关系

$$m(-\vec{v}_0) - m(\vec{v}_0) = \vec{N}_c \cdot t, \quad \vec{v}_0 : v_0 \text{ 变化}$$

又有 $\vec{N}_c = -\frac{2mv_0}{\Delta t} \hat{x}$ ①，当 $|\vec{N}_c| > |G|$ 时，不会飞起

又：球碰撞时，一般有 $|\vec{N}_c| \gg |\vec{G}|, |\vec{F}_g|, |\vec{N}_a|$

∴ ①右侧三个力忽略不计 ②

此时相对墙面，有 $\vec{v}_{\text{tangential}} = \vec{\omega}_0 \times (\vec{r} \hat{x})$
且 $v_0 \neq 0, \text{REO}$

∴ $\vec{v}_{\text{tangential}} \neq 0$ ，则会有滑动摩擦，

∴ 有 $\vec{f} = \mu \vec{N}_c \hat{y} = \frac{2\mu mv_0}{\Delta t} \hat{y}$ ③

$\vec{M} = (\vec{F} \times \vec{r}) = \frac{2\mu mv_0 R}{\Delta t} \hat{z}$ ④

①当碰撞时 $|\vec{v}| > 0$ 时，有 $\vec{\omega} \perp \vec{v}$ 成立。

∴ 有 $J = \frac{2}{5}mR^2$, $\vec{\omega}_0 = \omega_0 \hat{z}$

∴ 有 $J\vec{\omega} = J\vec{\omega}_0 + \vec{M} \cdot t$

∴ $\vec{\omega} = \vec{\omega}_0 + \frac{5}{2mR^2} \cdot \frac{2\mu mv_0 R}{\Delta t} \hat{z}$

= $\vec{\omega}_0 + \frac{5\mu v_0}{2R} \hat{z}$

∴ 有 $\omega_0 - \frac{5\mu v_0}{R} > 0$

∴ $\mu < \frac{\omega_0}{5v_0} = \frac{1}{5}$

此时有 $\vec{\omega} = (\frac{5\mu v_0}{R} - \omega_0) \hat{z}$ ⑤

⑥ $\mu > 0$ 时，有 $\vec{\omega} = \vec{0}$ ⑥

A good example

Problem Sets

Almost every week a problem set will be due. This homework will typically consist of five or six problems. To receive full credit for the written component of your homework, you must prepare and submit lucid and clearly reasoned written solutions. A selection of these problems will be graded and returned.

Tip for success

Work more frequently. Do your homework in frequent, small pieces. Do a few problems one night, a few problems on another. This ensures that any insights you have will stay in your brain, helping you understand and remember things better in the long run.

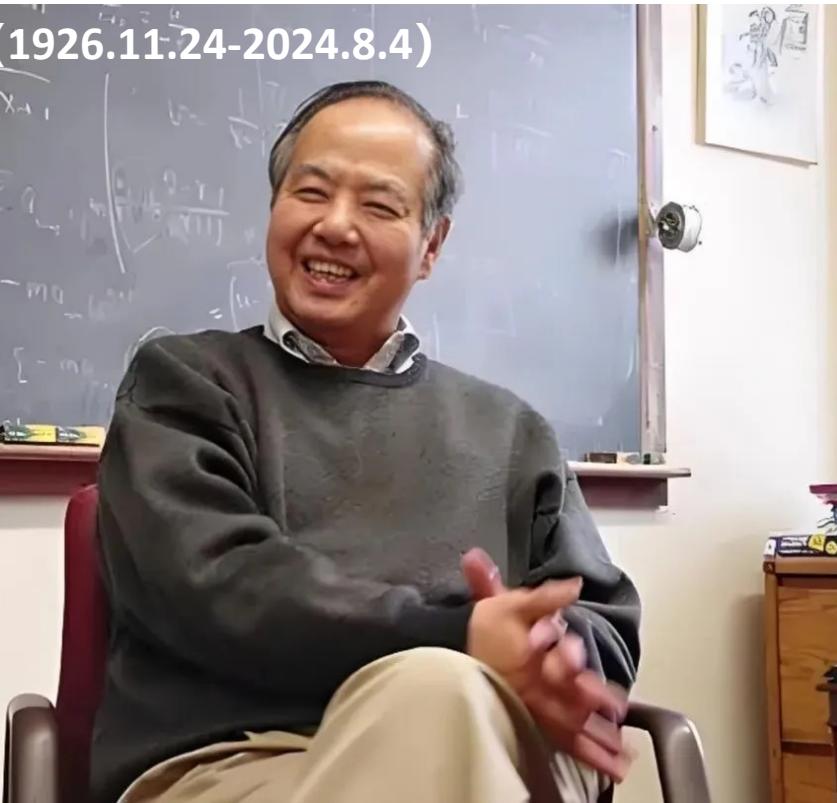
总结

- 为什么要学力学
 - 力学是物理学各学科中发展最早、最先成熟的学科，力学的研究方法曾给其它学科以深刻的影响，其许多原理在其它学科都有广泛的应用
 - 从中学到大学，思维方法、学习方式都需要经历重大转变，力学首当其冲。能把力学学好，整个大学的学习将受益匪浅
- 如何学好力学
 - 信心+态度+实战

态度决定一切！

总结

李政道 (1926.11.24-2024.8.4)



GPA???

“细推物理须行乐，何用浮名绊此身。”

物理是李政道先生的生活方式，他乐在其中。
李政道曾说过，“试图以我们有限的人类智慧去理解大自然的无限奇迹，是一个永无止境的故事。”

“作为开创华人获得诺贝尔奖历史的物理大师之一，李政道先生在六十多年的学术生涯中严谨治学，在量子场论、基本粒子理论、核物理、统计力学、流体力学、天体物理等诸多领域，力寻突破，不断攀登科学高峰，求实求真，为物理学的发展做出了持久而明确的贡献。”