

第一章：绪论

李 阳

中国科学技术大学近代物理系



力学A · 2025年秋

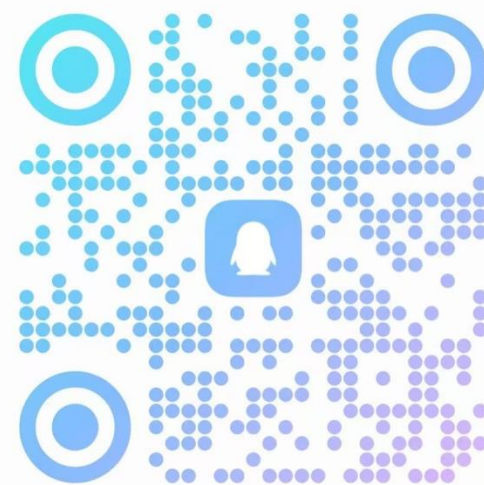
内容

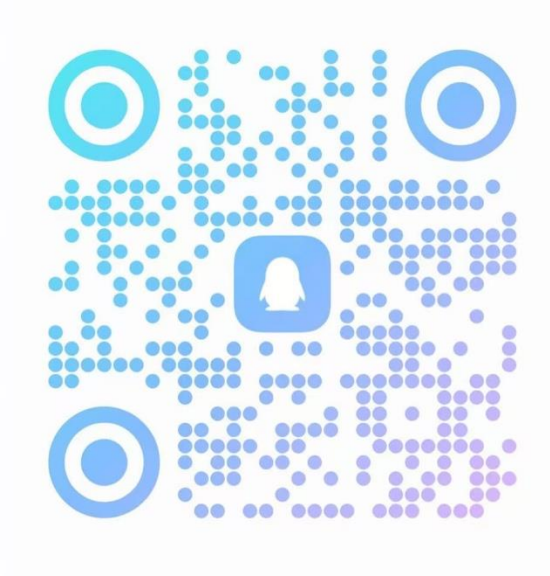
- 课程信息
- 前言
- 力学批判小史
- 测量与估计

§1. 课程信息

a. 教学安排

- 力学A（4学分），2025年秋，80学时
 - 学时：80学时即需要18周教学。但2024年秋实际只有16周教学周，因此需要补课，力学课程组统一安排每周占用1节课时间（20~30分钟）
 - 时间地点：二教5307，周二9:45-11:20（第1、2节）；周五14:00-15:35（第6、7节），注意**具体地点以教务处公布为准**
- 主讲：李阳
 - 办公室：东区物质科研楼C1202
 - 邮箱：leeyoung1987@ustc.edu.cn
 - 课程QQ群：1060933850（可扫码入群）



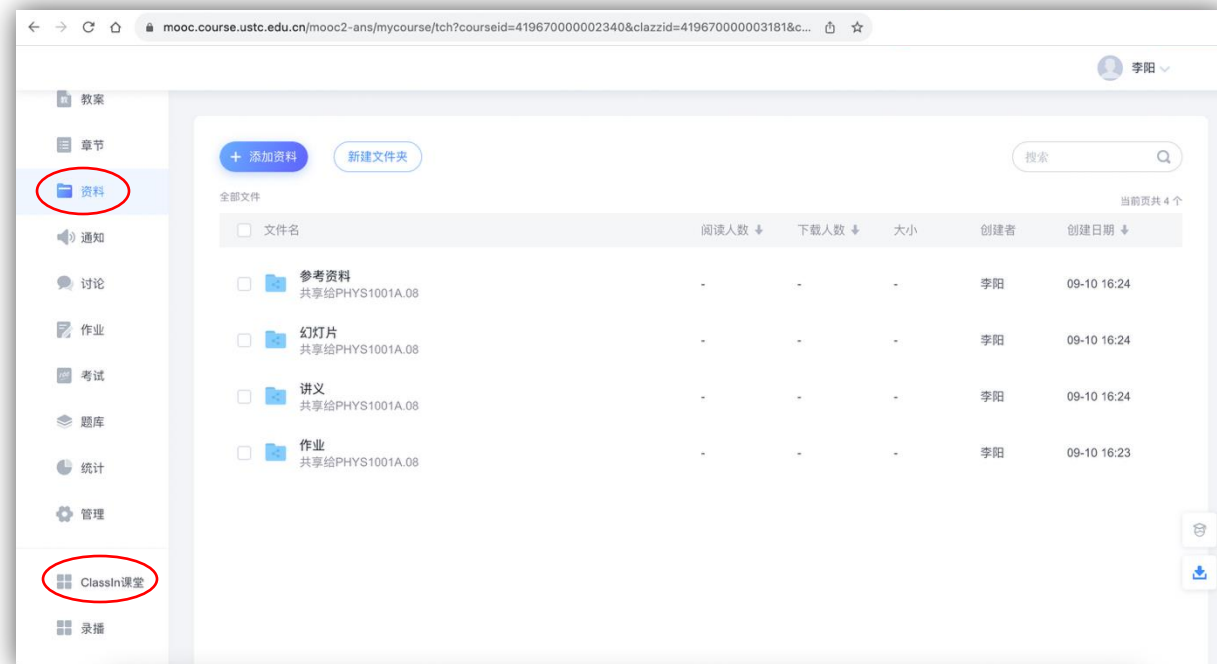


东区五教5307

东区物质科研楼C座12楼
C1202

- 助教：习题课、答疑、作业、考前复习等等
 - 陈一扬, cyy342106557@mail.ustc.edu.cn
 - 曹佳丰, ustc_cjf@mail.ustc.edu.cn
- 教材：《交叉科学基础物理教程·力学》，第二版，刘斌
- 参考书：
 - 《力学与理论力学》上册，杨维絃，2025年第三版
 - 《力学》，郑永令，贾起民，复旦大学出版社，1992年、2002年
 - 《新概念物理教程·力学》，赵凯华、罗蔚茵，1995年
 - 《力学》，刘树新，“101计划”核心教材（Bilibili上有课程视频）
 - 《力学讲义》，赵亚溥，科学出版社，2018年
 - 《费曼物理学讲义》第1卷，理查德·费曼，郑永令（译），2020年

- 授课方式：以板书为主，幻灯片作为辅助
- 课程网站：瀚海教学网 course.ustc.edu.cn
 - 作业
 - 参考资料
 - 讲义、幻灯片



b. 考核形式

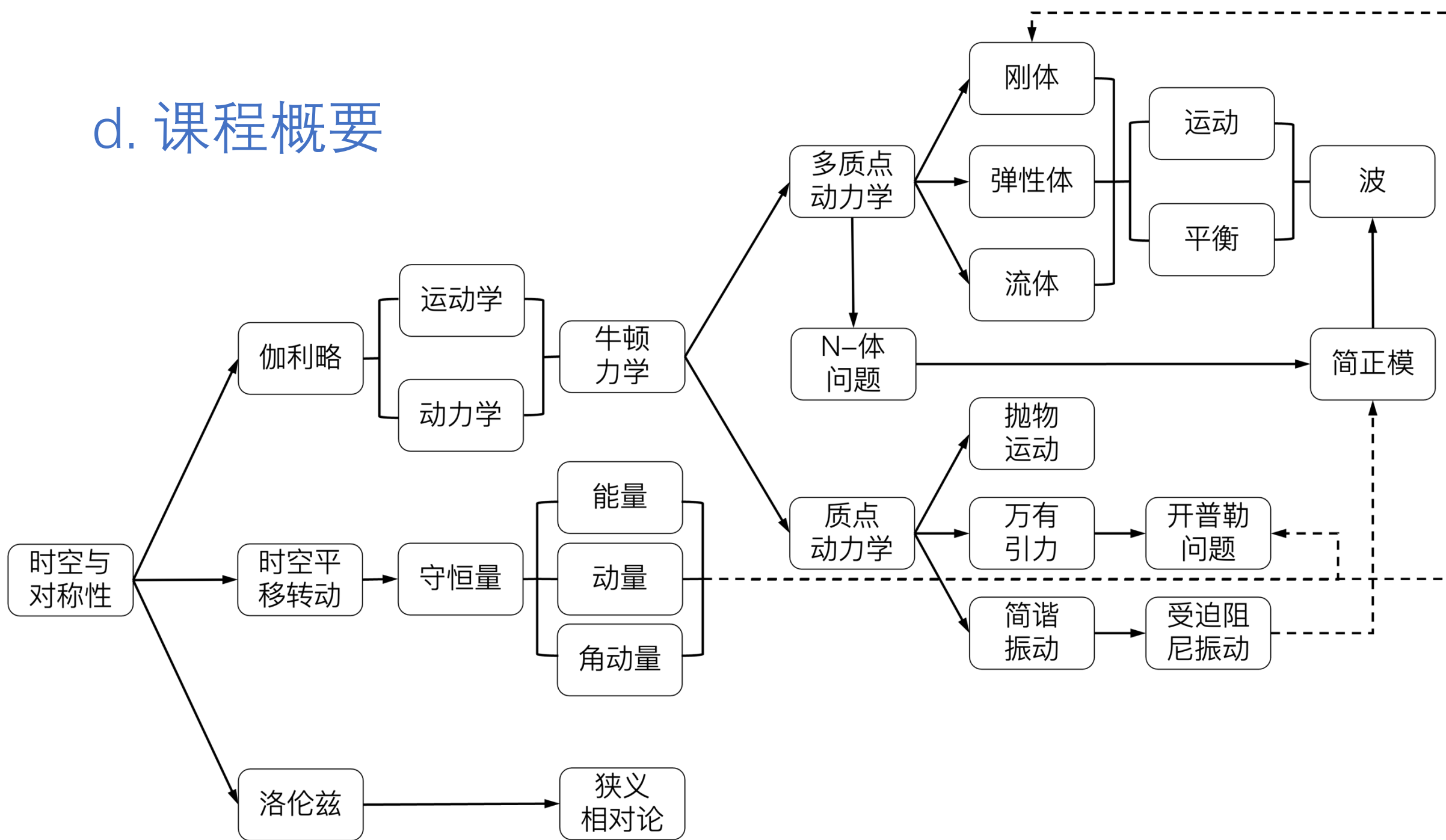
总评 = 平时表现 5% + 作业 25% ~ 30% + 期中考试 20% ~ 30% + 期末考试（**全部都考**） 40% ~ 50%，会视期中、期末情况灵活调整

- 平时表现：出勤、课堂互动、回答问题以及其他优秀表现
- 学校要求，每两周安排一次**随堂测验**，15-20分钟，计划安排在周二第5节课，成绩计入平时成绩或考试成绩
- 作业：可以讨论、查资料，不允许抄袭（包括AI）；发布题目以后2周内交作业，延迟1-2周 95%，延迟3-4周 85%，延迟4周以上 75%，**不交作业 0%**
- 期中期末考试形式：**闭卷**。期中考试各个班单独命题，期末考试100%题目为全校统一命题

c. 课程计划

- 第1章 绪论、时间、空间与测量
- 第2章 质点运动学（包括微积分、矢量代数）
- 第3章 牛顿动力学
- 第4章 万有引力
- 第5章 守恒定律
- 复习和期中考试（最晚11月中旬）
- 第6章 刚体力学
- 第7章 弹性力学初步
- 第8章 流体力学初步
- 第9章 振动和波
- 第10章 相对论
- 复习和期末考试（1月中上旬）

d. 课程概要



e. 课程简介

- 力学是大学第一门普通物理课程，主要介绍与描述、研究物体机械运动有关的基本概念、基本理论和相关研究方法
- 课程以微积分为工具，在此基础上对自然界的机械运动进行描述，了解其遵循的规律性
- 注意用新的近代观点处理老的内容。对空间、时间、惯性等基本概念，能量守恒、动量守恒、角动量守恒等基本规律进行较深入的讨论。课程将以物理学的前沿最新成果来充实教学内容
- 力学是第一门大学普通物理基础课，着重于对基本概念和基本规律的阐述，为学生的后继课程及专业训练作好必要准备，打好物理基础

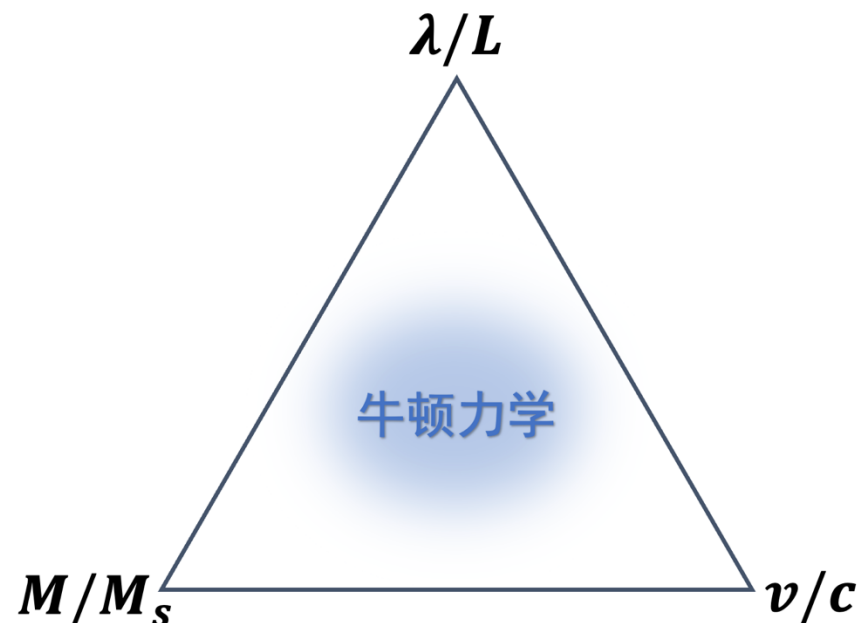
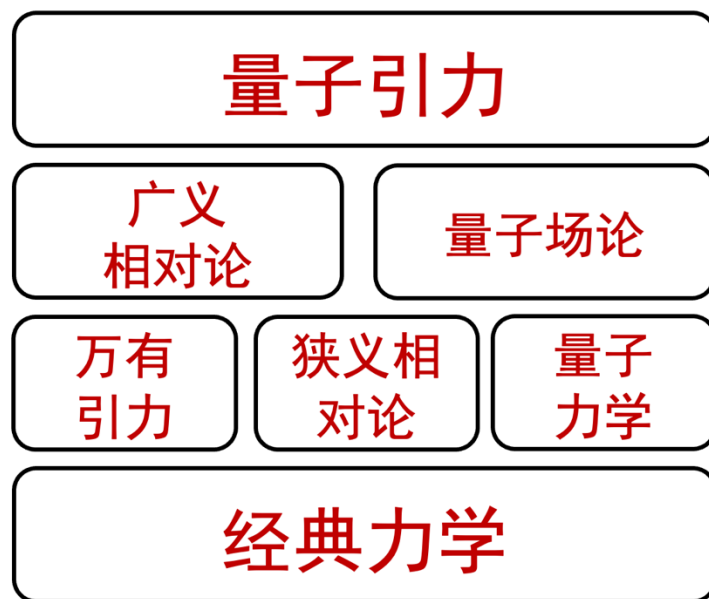
- 力学课不是经典力学/理论力学课程

物理专业的经典力学课更侧重形式理论的发展（拉格朗日形式理论、哈密顿形式理论）以及力学概念的进一步发展（对称性、正则变换），还可能包括将力学原理推广到无穷自由度体系（场论）。这一课程是为了学习更高级的物理课做准备（量子力学、电动力学、广义相对论、统计力学、量子场论）。

- 力学课也区别于材料力学、固体力学、断裂力学、流体力学等工程或工程物理专业课程，虽然这些方面的初步的知识会有少量涉及
- 本课程不涉及现代力学的前沿内容

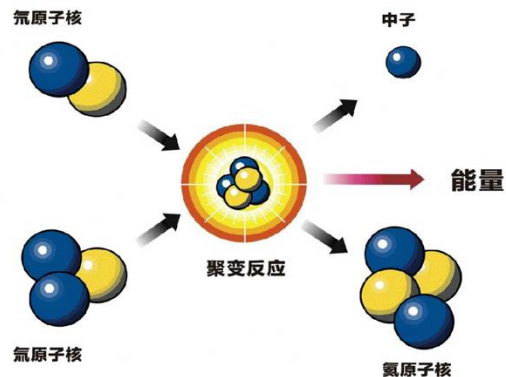
§2 前言

- 物理学是物质科学的基础，而“力学则是数学物理的脊柱”（索末菲）
- 牛顿力学作为宏观、低速、弱引力情形下的有效理论
 - 高阶效应：程函展开、非相对论展开、后牛顿展开

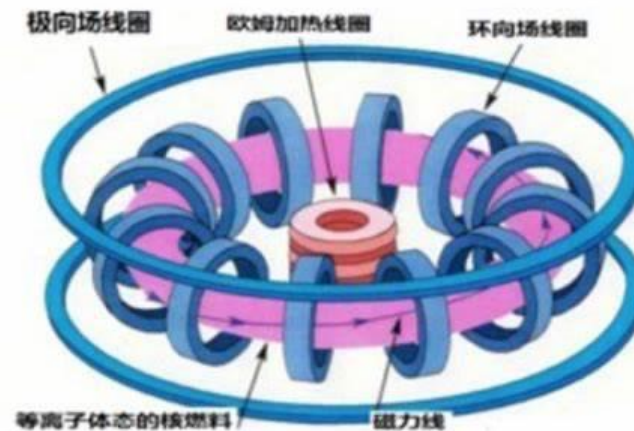


a. 为什么要学力学？

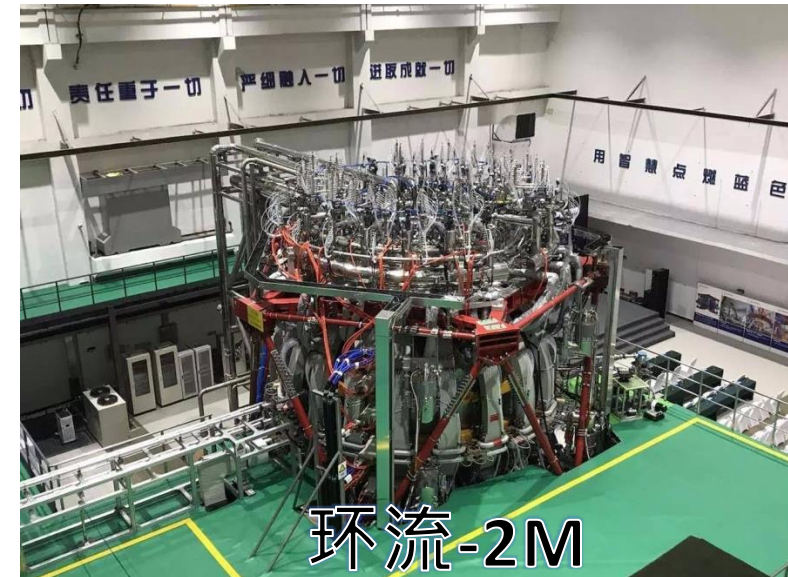
- 力学提供的方法、概念和物理图像仍然是现代物理的核心
能量、动量、角动量；微扰论、散射；质量、引力；
- 力学是现代科学和工程学的基础，也是现代工业的基础



氘氚聚变

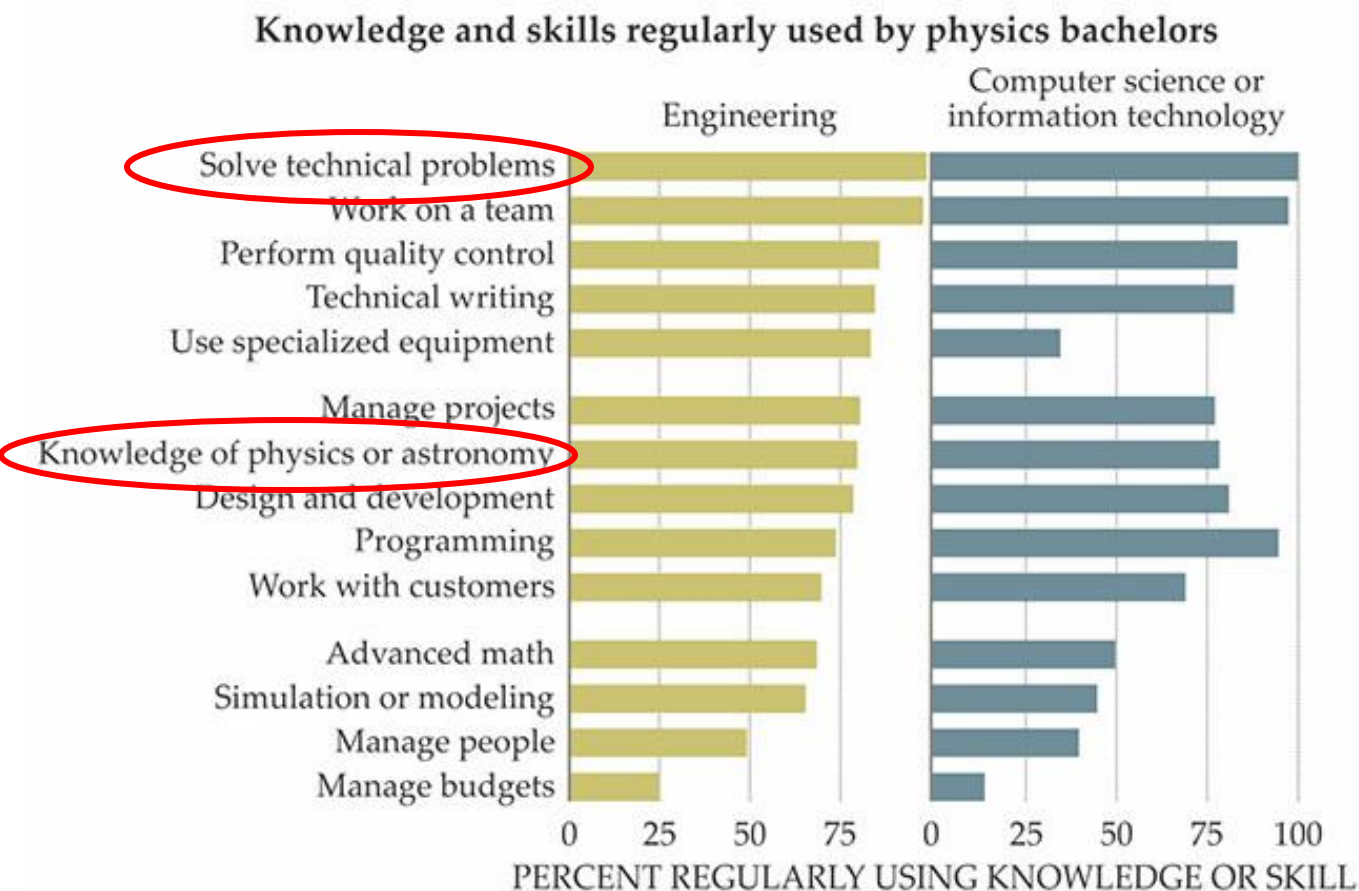


托卡马克磁约束



学好物理很重要

- 力学课：分析和解决问题的能力
- 实验课：团队协作



03 物理学科的重要性		
学科门类	本科专业类	内设专业
工学	机械类	机械工程, 机械设计及及其自动化, 材料成型及控制工程, 机械电子工程, 工业设计, 过程装备与控制工程, 车辆工程, 汽车服务工程, 机械工艺技术, 微机电系统, 机械教育, 汽车维修工程教育
	仪器类	测控技术与仪器
	电气类	电气工程及其自动化, 电气工程, 光源与照明, 电气工程与智能控制, 智能电网信息工程, 电气工程
	电子信息类	电子信息工程, 电子科学与技术, 通信工程, 微电子科学与工程, 光电信息科学与工程, 信息工程, 广播电视工程, 集成电路封装技术, 集成电路设计与集成系统, 医学信息工程, 天线, 电子信息科学与技术, 教育
	自动化类	自动化, 邮政工程
	计算机类	计算机科学, 网络工程, 数字媒体技术, 计算机工程, 技术, 电影制作

物理学专业毕业的商业精英、社会领袖：



张朝阳
搜狐



杨勃
豆瓣



邓辉
虹软



Elon Musk
SpaceX, Tesla, ...



Stephen Wolfram
Mathematica



Richard Stallman
GNU



Angela Merkel
德国前总理



Brian May
音乐家

b. 如何学好力学？

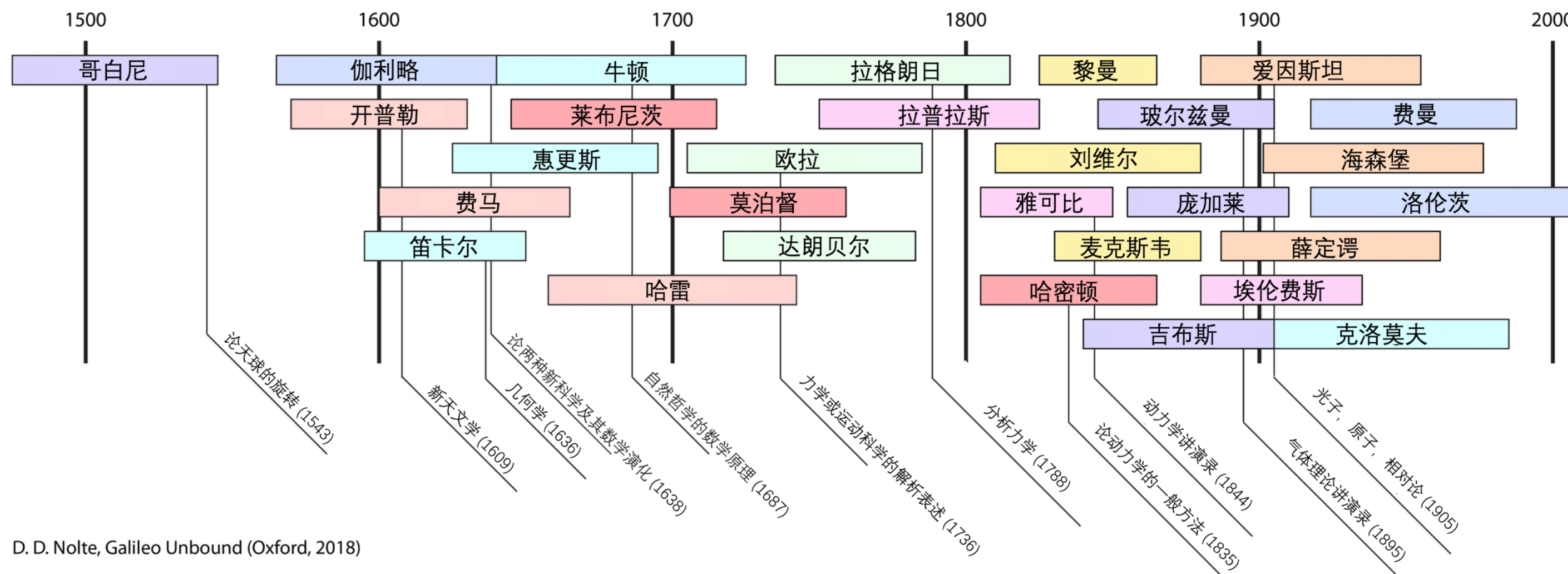
- 能力的提升需要学习方法的转变：

	高中	大学	研究生
知识面	宽（较窄）	较宽	窄
知识深度	较浅	较深	深
知识系统性	不成体系	体系性较强	体系不唯一
知识获取	以教师为中心： 听课+作业+考试	以学生为中心： 听课+讨论+项目+报告	以研究为中心： 自学+上手做+论文+演讲
学习方法	做题	理解	创造

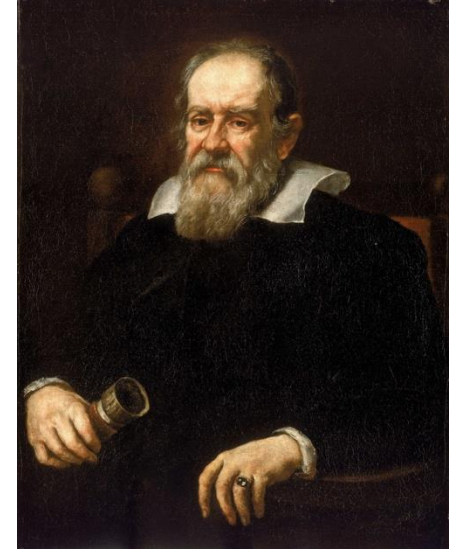
《礼记·学记》：君子之教，喻也。

§3 力学批判小史

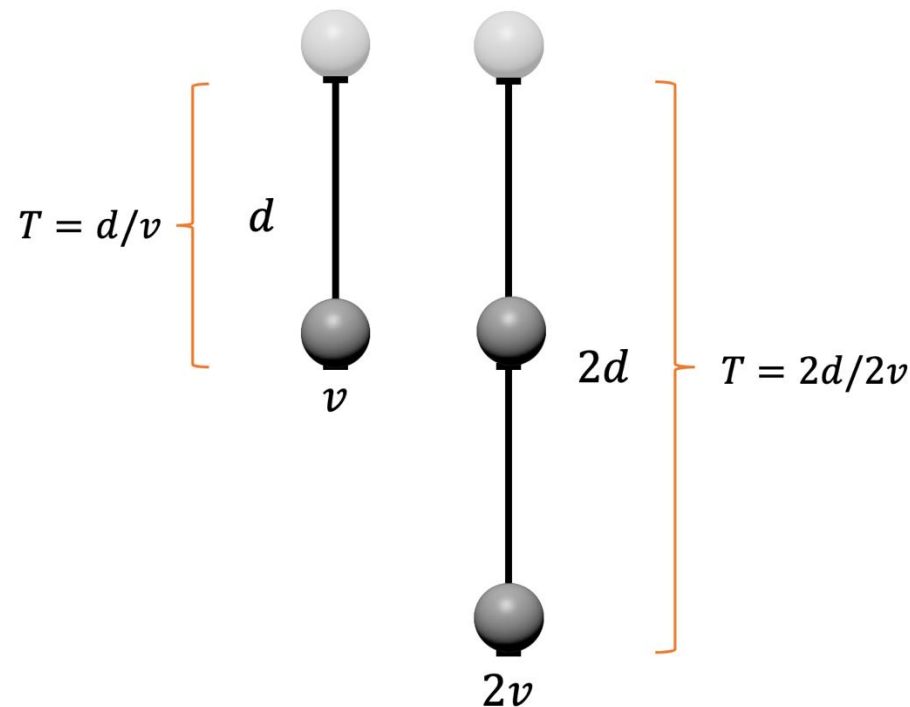
- 力学：静力学、运动学、动力学
- 力学作为一门现代科学：伽利略



a. 伽利略：落体的运动规律

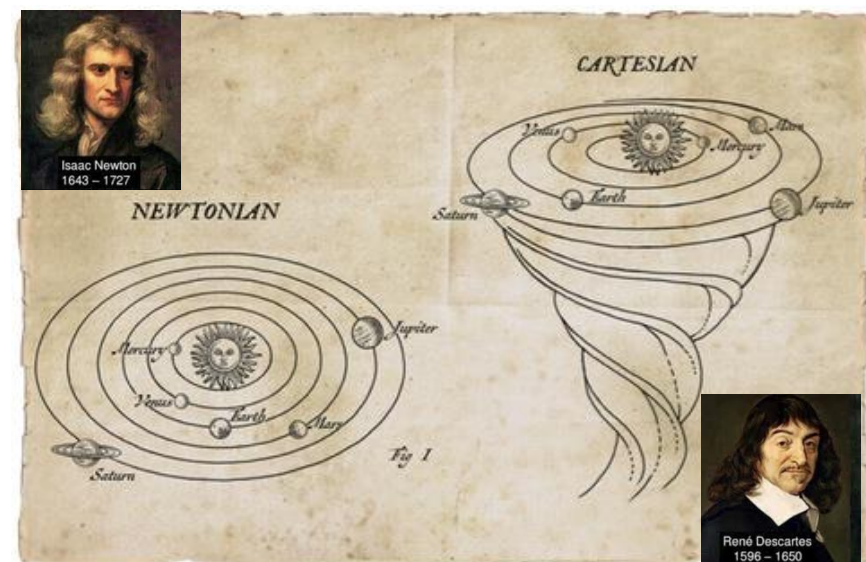


- 亚里士多德：物体倾向于“自然运动”
- 伽利略：不去发问重物下落的原因，而是探索重物下落的规律
 - 伽利略的科学方法：从某些假设出发，通过逻辑推演获得落体运动规律，并通过定量实验来考察这些假设是否正确
- 例子：
 - 假设：落体速度正比于下落距离



b. 牛顿：天体的运动规律

- 牛顿：建立了力学的公理化体系，采用数学方法推导出开普勒天体运动定律
- 牛顿的科学方法：
 - 自然哲学不关心某个现象背后的起因(causes)，而仅仅研究和转述事实(facts)
 - 天体与地球上的物体遵循相同的物理规律，即物理定律具有普适性
- 例子：
 - 笛卡尔认为天体运动起源于真空中的涡旋
 - 牛顿认为物体运动状态的改变是由于天体之间存在相互作用，叫做万有引力。通过假定力的形式结合牛顿第二定律可以推导出天体运动规律，反之亦然。而力尤其是万有引力的本质/起源与天体运动无关，因此不做探究



“Hypotheses non fingo”

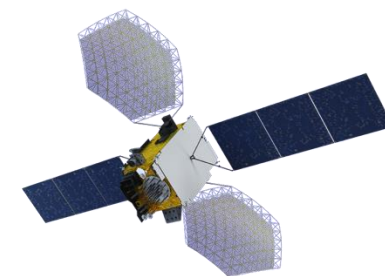
“迄今为止，我们已经用万有引力解释了天体和海洋的现象，但还没有指出这种力量的原因.....我无法从现象中发现万有引力的这些特性的原因，**我也没有提出任何假设 [hypotheses non fingo]**；因为任何不是从现象中推导出来的东西都被称为假设；而假设，无论是形而上学的还是物理学的，无论是神秘的还是机械的，在实验哲学中都没有地位.....。.....对我们来说，万有引力确实存在，并且按照我们已经解释过的规律运行，足以解释天体和海洋的所有运动，这就足够了。” —— 牛顿《原理》



c. 科学思想的多样性

- 例子：
 - “场”：笛卡尔、法拉第、德布罗伊、狄拉克
 - 粒子观：分子论、汤川理论、标准模型
 - 统一观：天体与落体的统一，光、电、磁的统一，电弱理论的统一，大统一
 - 涌现论：多者异也 (more is different)
- 学习物理在理解这些想法的同时，要分清楚思想与事实

§4 测量与估计



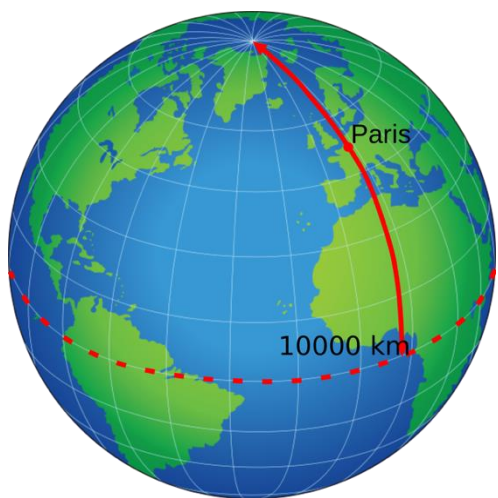
- 测量是力学乃至物理学的基础
- 最基本的测量是长度和时间的测量

标准	周期性装置	发明时间	不确定度 (24小时)	相对不确定度
日晷	太阳的位置	公元前3500年	NA	NA
机轴式擒纵钟	机轴式擒纵装置	14世纪	15 min	1×10^{-2}
钟摆	单摆	1656	10 sec	7×10^{-4}
哈里森钟	单摆	1759	300 msec	3×10^{-6}
肖特钟	擒纵结构的双摆	1921	10 msec	1×10^{-7}
石英晶体	石英晶体	1927	$10 \mu\text{sec}$	1×10^{-10}
铷气体室	铷-87共振态	1958	100 nsec	1×10^{-12}
铯束	铯-133共振态	1952	1 nsec	1×10^{-14}
氢原子微波激射器	氢原子共振态	1960	1 nsec	1×10^{-14}
铯钟	铯-133共振态	1991	100 psec	1×10^{-15}

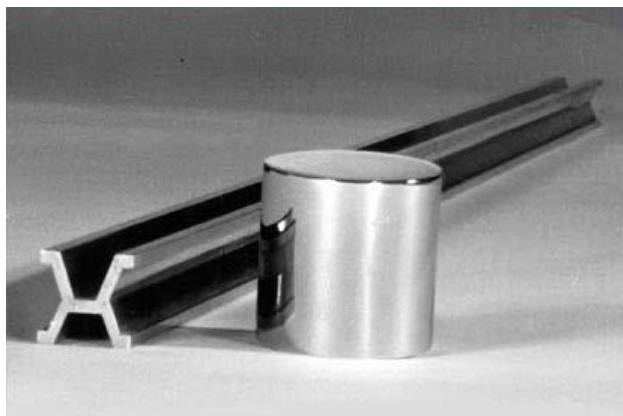


a. 国际单位制

- 米制公约
- 国际单位制 (SI)
- 基本单位：米、秒、千克、安培、开尔文、坎德拉
- 目标：单位制的定义不依赖于人造器物



1792-1889



1889-1960

$$1 \text{ m} = \frac{c}{299\,792\,458} \text{ s}$$

$$1 \text{ m} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$
$$\approx 30.663\,319 \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

1960-

a. 国际单位制

- 在2019年最新发布的国际单位制中，所有单位制的定义不依赖于人造物

- 时间的定义由铯钟给出
- 其他单位由基本物理常数给出
- 基本物理常数的值固定

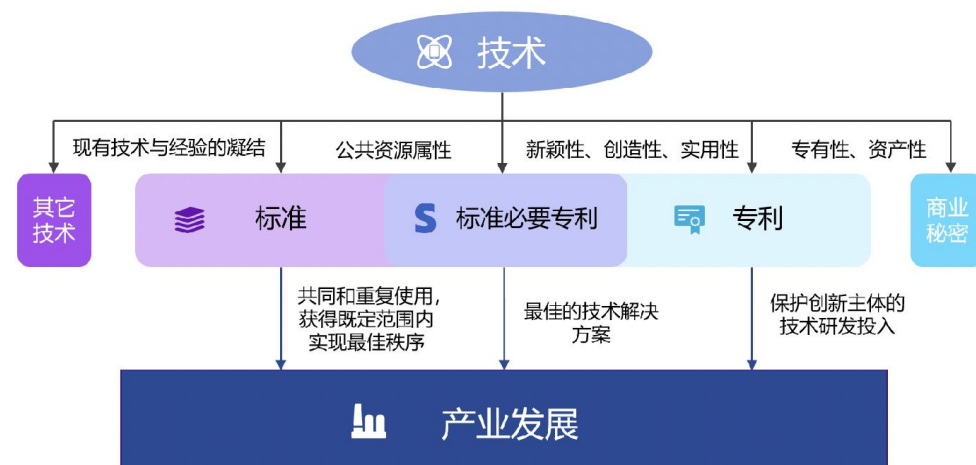
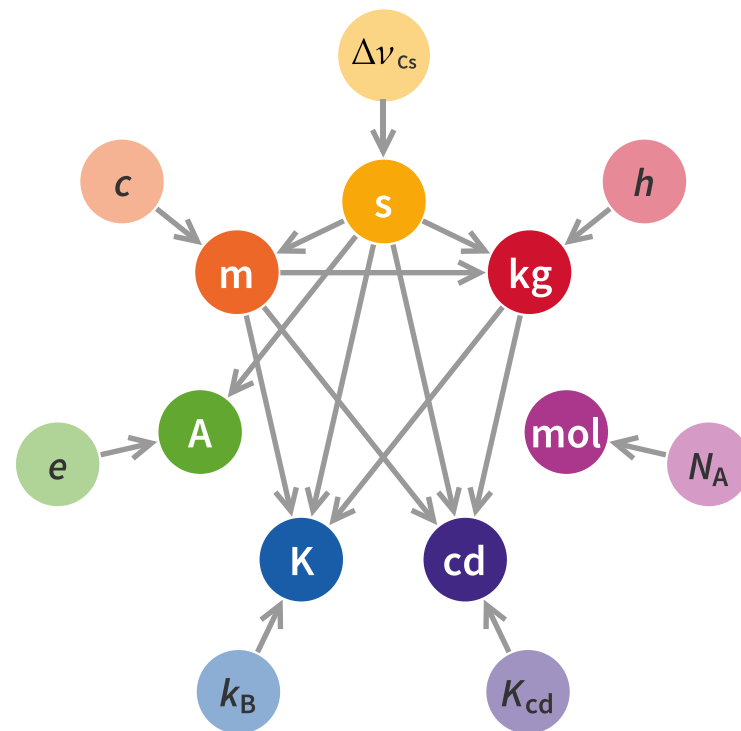
例如：真空光速等于299792458 m/s

- 词头：

飞、皮、纳、微、毫、千、兆、吉、太、拍

10^{-15} , 10^{-12} , 10^{-9} , 10^{-6} , 10^{-3} , 10^3 , 10^6 , 10^9 , 10^{12} , 10^{15}

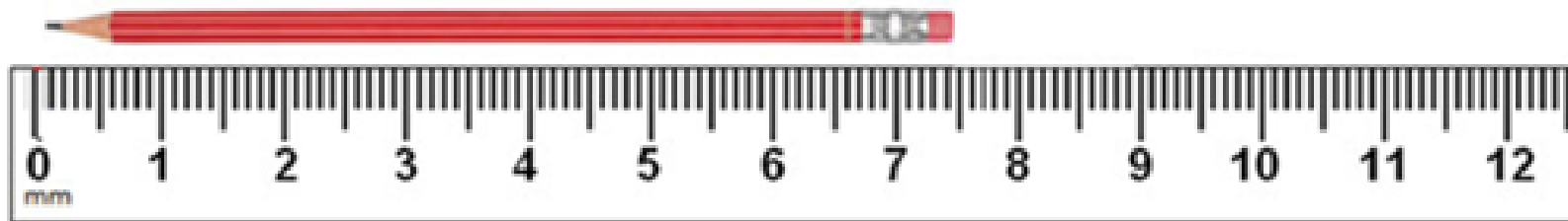
- 科技创新的启示：解决方案 → 专利 → 标准



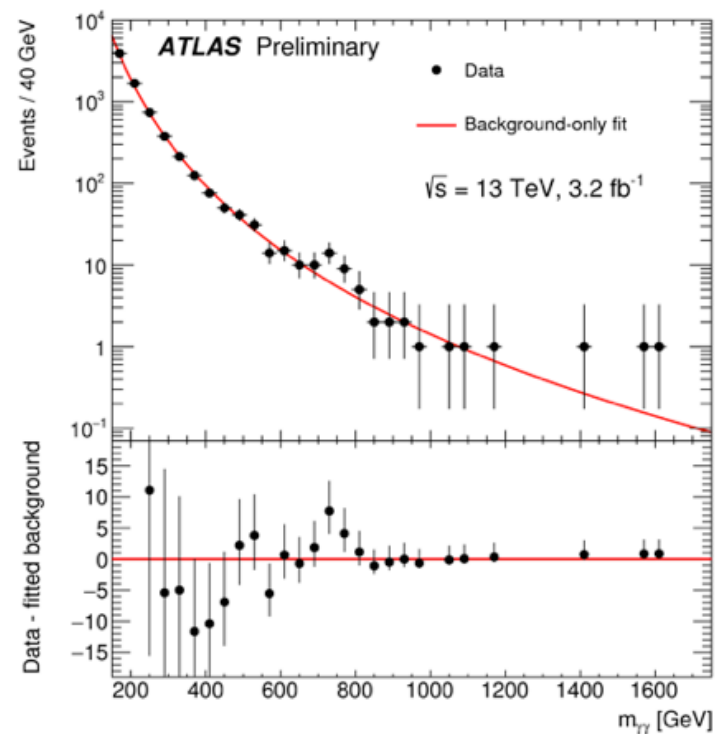
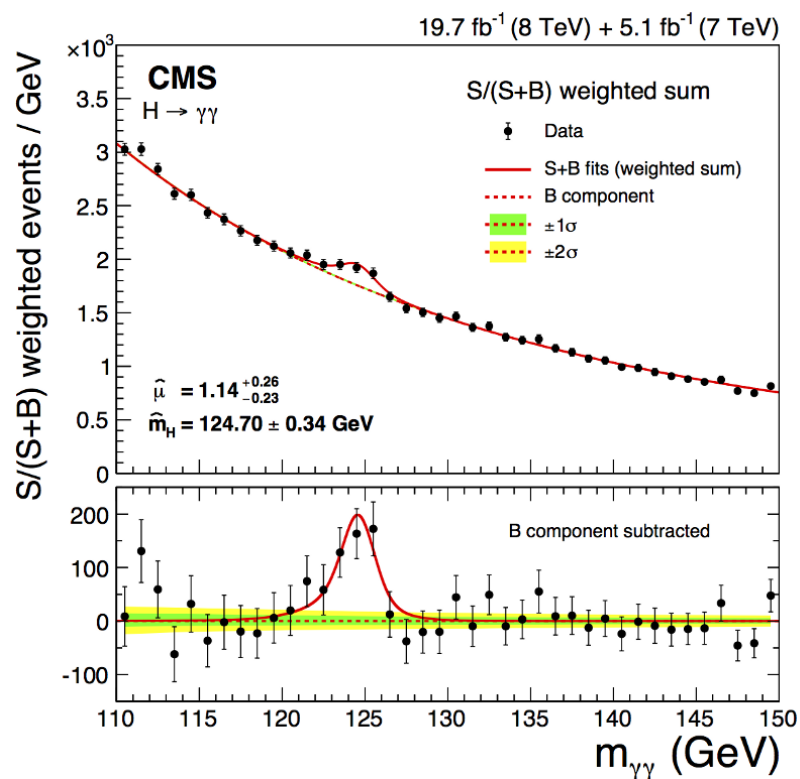
b. 不确定度

真实的测量，总是存在一定程度的不确定性

- 有效数字
- 科学计数法



- 误差 (error): 测量值与真实值之间的偏离
- 不确定度 (uncertainty): 测量值的分布
 - 来源: 统计不确定度、系统不确定度
- 一个有效的测量, 不仅仅要包括测量结果, 还要包括测量的不确定度

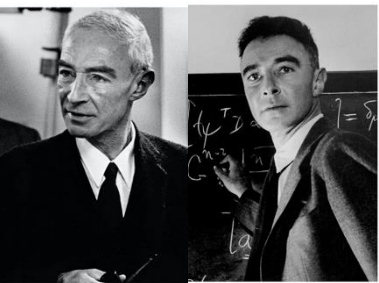
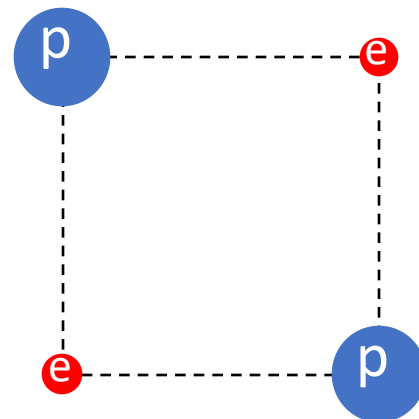


c. 数量级估计

与测量相对应的是估计，这同样是研究物理的重要手段

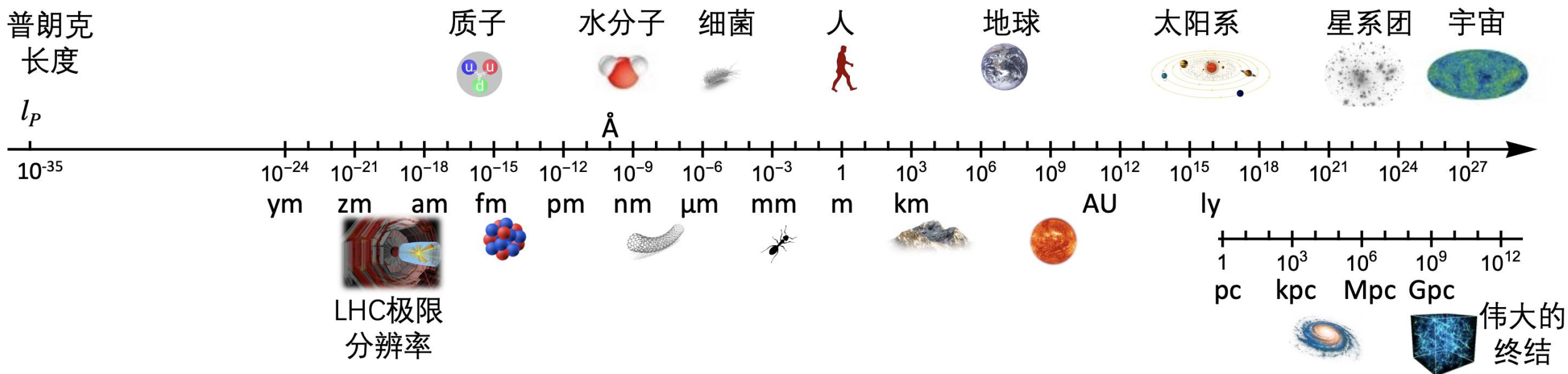
- 数量级：每差10倍，叫做差一个数量级
- 宇宙以层级的形式出现，相似的物理结构具有差不多的数量级
- 数量级估计可以帮助我们迅速锁定其中的主导物理因素

【例子】两个质子、两个正电子放在一个正方形上。初识时刻零速度释放。求充分长时间以后质子、正电子末态速度。



d. 自然界的尺度

为了进行估计，我们要对与自然界的尺度有所了解



“费米问题”

费米问题：在芝加哥有多少钢琴调琴师？

我们可以采用以下的假设：

- 大约有900,000 人生活在芝加哥。
- 在芝加哥平均每个家庭有2个人。
- 大约在20个家庭中有1个家庭需要定期钢琴调音。
- 定期调琴的钢琴每年需要调整一次。
- 每个调琴师大约需要2小时调琴，包括路上时间。
- 每个调琴师每天工作8小时，一周5天，一年50周。



费米问题：在芝加哥有多少钢琴调琴师

- 由此，我们可以计算出每年在芝加哥需要调整的钢琴数量是
$$(9,000,000 \text{ 人在芝加哥}) / (2 \text{ 人/家}) \times (1 \text{ 架钢琴}/20 \text{ 家}) \times (1 \text{ 架钢琴调整}/1\text{年})$$
$$= 22,5000 \text{ 架钢琴在芝加哥需要每年被调整。}$$
- 类似地计算出每年平均每个调琴师可以调：
$$(50 \text{ 周/年}) \times (5 \text{ 天/周}) \times (8 \text{ 小时/天}) / (2\text{小时}) = 1000 \text{ 架钢琴。}$$
- 从而可以得到：
$$(225,000 \text{ 架钢琴在芝加哥每年被调整}) / (1000 \text{ 架钢琴每年}/1\text{调琴师}) = 225$$
$$\text{个调琴师在芝加哥。}$$
- 事实上，统计表明 一共有大约290名调琴师在芝加哥。

全世界有多少只猫？

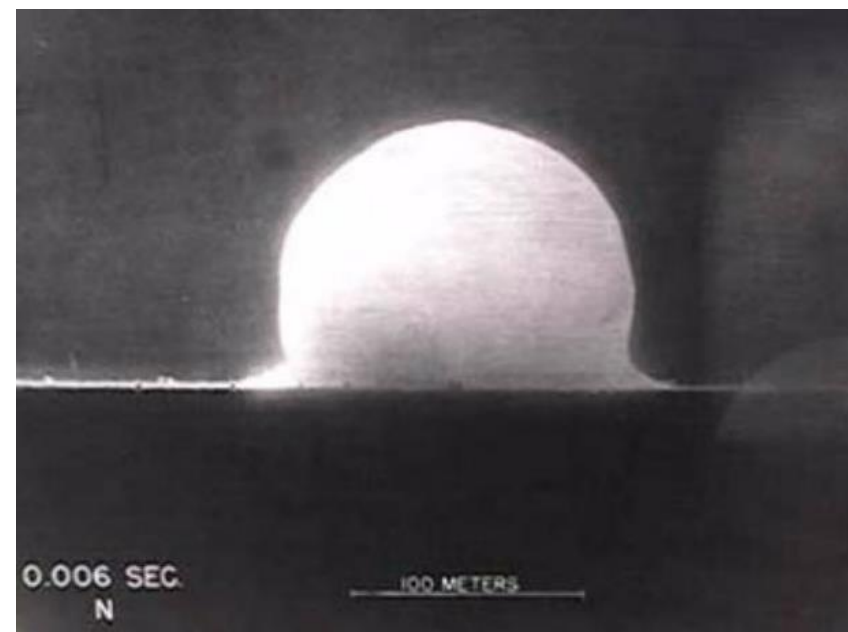
全世界有多少只猫？

- 人口80亿、平均一个家庭2人，平均10个家庭1个家庭有猫，平均每个有猫家庭有1只猫——计算可以得到共4亿只猫。
- 统计表明全球共6亿只猫，但是2亿只是家猫、4亿只是野猫。因此平均20个家庭里面有1个家庭养猫。

e. 量纲分析

物理规律与单位制的选择无关，这就要求与问题相关的物理量之间满足一定的量纲关系

【例子】1950年，美国生活杂志发布了一张美国第一次核爆“三位一体”测试的照片。流体力学大师G.I.泰勒根据这张照片估计出该次爆炸的当量，而这当时还是美国国家机密。



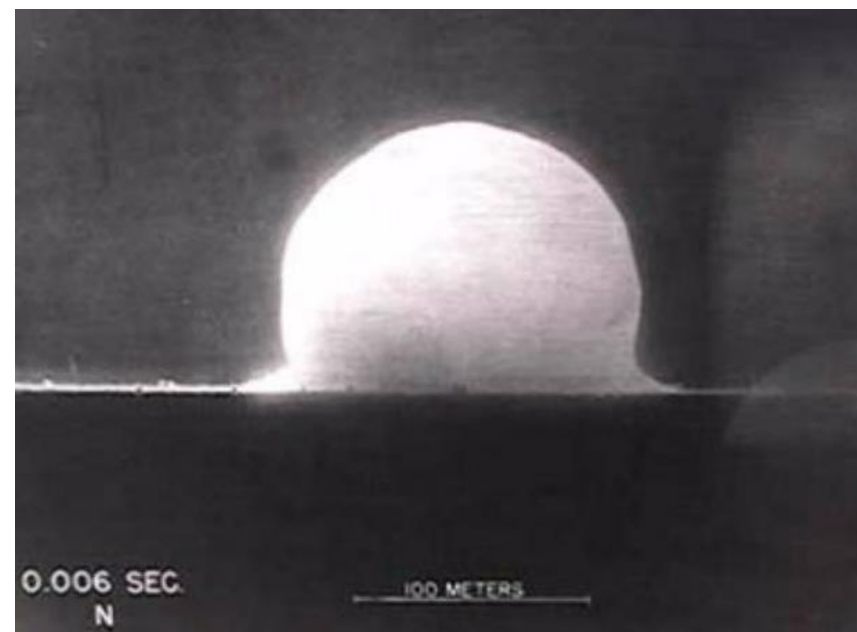
泰勒假设原子弹爆炸的火球半径 R 与总能量 E 、时间 t 、空气密度 ρ 有关。量纲分析：

$$R = [L],$$

$$t = [T],$$

$$E = [ML^2T^{-2}],$$

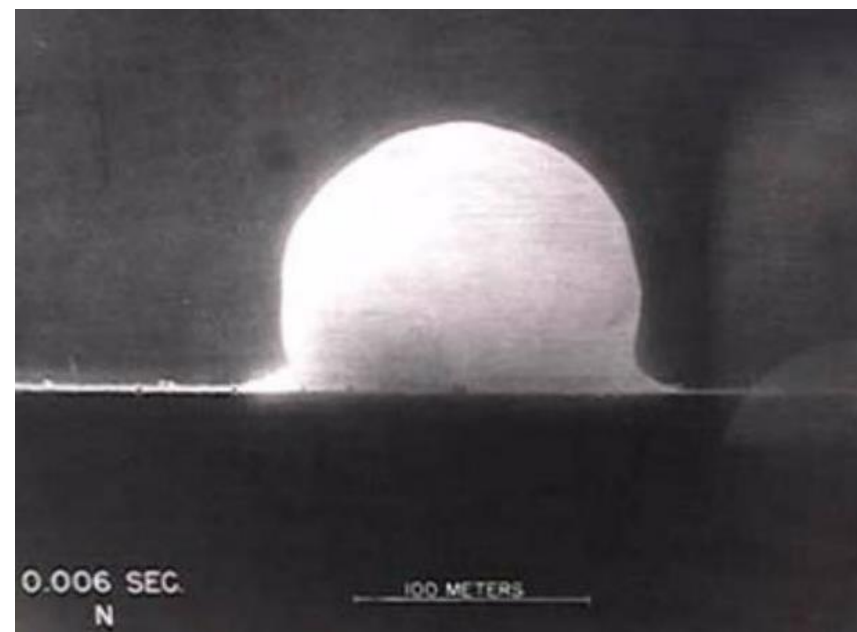
$$\rho = [ML^{-3}]$$



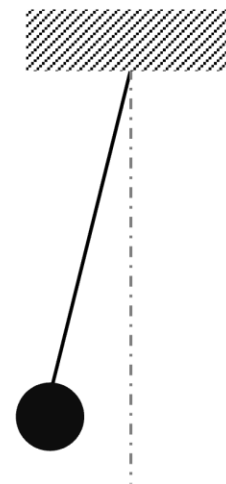
泰勒假设原子弹爆炸的火球半径 R 与总能量 E 、时间 t 、空气密度 ρ 有关。通过量纲分析可以得到,

$$R = C \left(\frac{Et^2}{\rho} \right)^{\frac{1}{5}}$$

根据照片可以得到, $t = 0.006 \text{ s}$, $R = 75 \text{ m}$, 空气密度为 $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$, 作为估计可以取 $C = 1$ 。由此得到, $E = 8 \times 10^{13} \text{ J}$ 。折合为TNT当量为2万吨TNT当量 (1 吨TNT当量 = $4.2 \times 10^9 \text{ J}$) , 据披露, “三位一体”实验核爆当量为1.8-2.0万吨TNT 当量。



【例子】 单摆周期， 相关物理量， 摆长 L ， 单摆的质量 m ， 重力加速度 g



【例子】 泊肃叶定理描述了充分长圆形管道中不可压缩流体的流量 $Q = \Delta V / \Delta t$ 与管道两端压力差 Δp 之间的关系。设流体粘滞系数为 η (单位Pa·s)，管道半径为 r ，管道长度为 l ($l \gg r$)。

【例子】泊肃叶定理描述了充分长圆形管道中不可压缩流体的流量 $Q = \Delta V / \Delta t$ 与管道两端压力差 Δp 之间的关系。设流体粘滞系数为 η (单位 $\text{Pa}\cdot\text{s}$)，管道半径为 r ，管道长度为 l ($l \gg r$)。

求解：通过量纲分析得到两个无量纲的量：

$$\frac{\Delta p}{l} \frac{r^4}{Q\eta}, \quad \frac{r}{l}$$

因此， $Q = \frac{r^4 \Delta p}{\eta l} \Phi\left(\frac{r}{l}\right)$ 。考虑 $r/l \ll 1$ 但 $\Delta p/l$ 恒定时，流量不为零，因此

$$Q = \frac{r^4 \Delta p}{\eta l} \Phi(0)$$

实际计算表明 $\Phi(0) = \pi/8$ 。

【例子】泊肃叶定理描述了充分长圆形管道中不可压缩流体的流量 $Q = \Delta V / \Delta t$ 与管道两端压力差 Δp 之间的关系。设流体粘滞系数为 η (单位Pa·s)，管道半径为 r ，管道长度为 l ($l \gg r$)。

上面的计算未考虑流体密度 ρ 。实际上，如果考虑流体密度，可以再组合出一个无量纲量： $\frac{pr^4}{\rho Q^2}$ 。即使考虑充分长管道 $\frac{r}{l} \ll 1$ ，也有两个无量纲常数。一般重新组合引入一个新的无量纲量 $\text{Re} = \rho D \bar{v} / \eta$ 叫做雷诺数。这里， $\bar{v} = \frac{Q}{\pi r^2}$ ， $D = 2r$ 。因此一般情况下，圆形长管的压强梯度为，

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = f(\text{Re}) \frac{\rho \bar{v}^2}{2r}$$

泊肃叶定律告诉我们，当 $\text{Re} \ll 1$ 时， $f(\text{Re}) \approx 32/\text{Re}$ 。

【例子】一个球形尘埃，在密度均匀的水蒸汽云雾中形成液滴，下降时液滴上的沉积率正比于单位时间内液滴扫过的体积。若液滴在云雾中从静止开始下落，求液滴的加速度。

【例子】一个球形尘埃，在密度均匀的水蒸汽云雾中形成液滴，下降时液滴上的沉积率正比于单位时间内液滴扫过的体积。若液滴在云雾中从静止开始下落，求液滴的加速度。

解答：

根据量纲分析，加速度 $a = Cg$ ，其中C为无量纲常数，即雨滴的运动为匀加速运动。

根据变质量体系方程，

$$a = g - \frac{dm}{dt} v = g - \frac{1}{m} \frac{dm}{dt} at$$

因此，

$$\frac{1}{m} \frac{dm}{dt} \propto \frac{1}{t}$$

故, t 时刻雨滴的质量增加量为,

$$dm = \rho v dt \pi r^2 = \rho a t \pi r^2 dt$$

$$\Rightarrow \frac{dm}{mdt} = \frac{3}{4} \frac{a}{r} \propto \frac{1}{t}$$
$$\Rightarrow r \propto t^2$$

$$\Rightarrow m = \rho \frac{4}{3} \pi r^3 \propto t^6$$

$$\Rightarrow \frac{dm}{mdt} = \frac{6}{t}$$

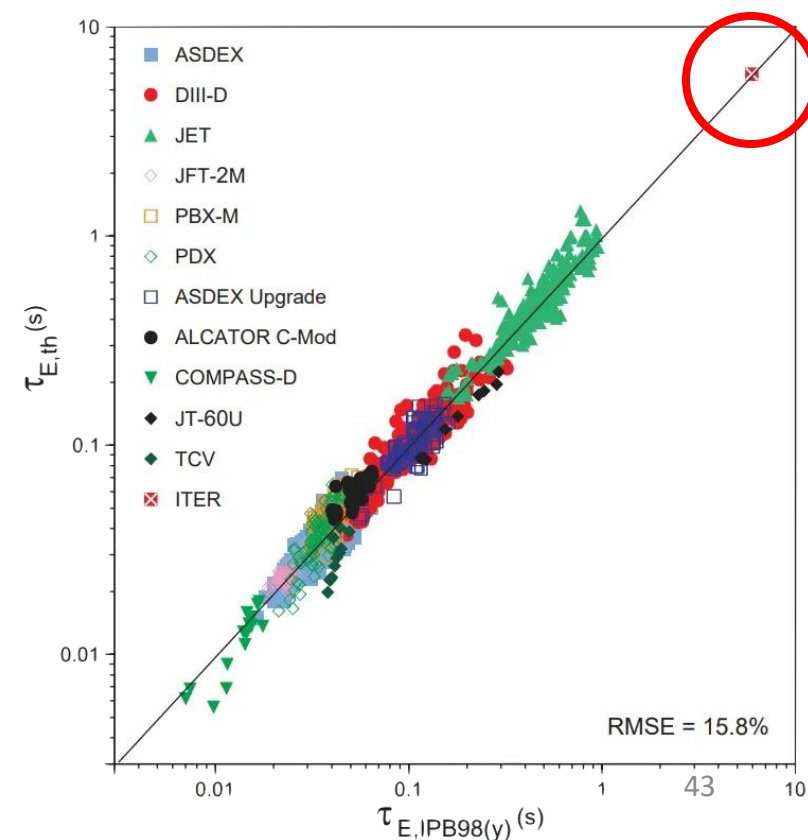
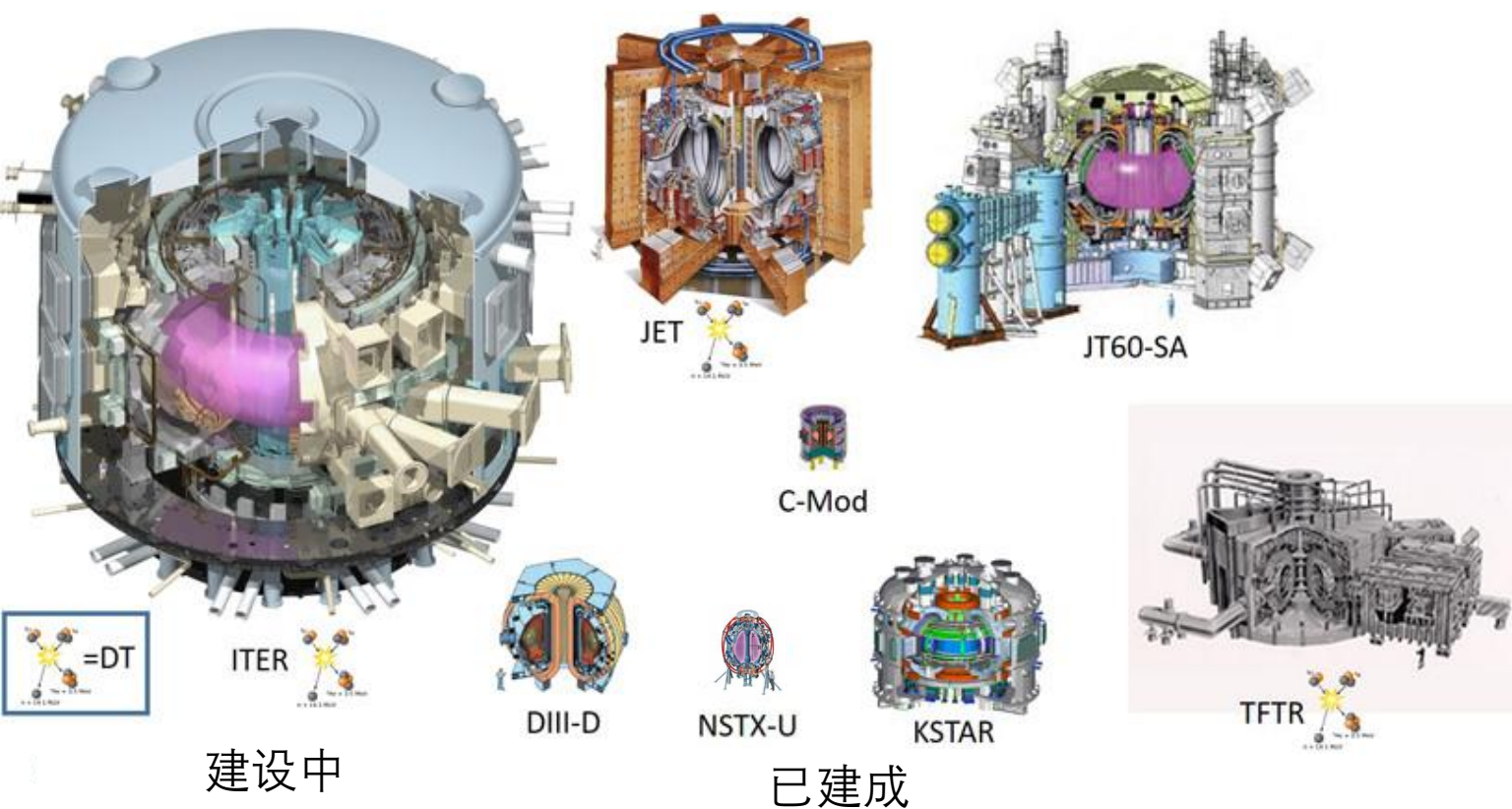
带入密舍尔斯基方程可以得到,

$$a = g - 6a$$

$$\Rightarrow a = \frac{1}{7} g$$

【例子】托卡马克定标率。与等离子体约束相关的装置指标为，等离子体电流 I ，磁场 B ，等离子体数密度 n ，等离子体加热功率 P ，等离子体环的半径 R ，等离子体截面半径 a 。通过拟合实验数据典型的托卡马克定标率给出，

$$\frac{\tau_E}{s} = 0.0562 \left(\frac{I}{\text{MA}} \right)^{0.93} \left(\frac{B}{\text{T}} \right)^{0.15} \left(\frac{n}{10^{19} \text{m}^{-3}} \right)^{0.41} \left(\frac{P}{\text{MW}} \right)^{-0.69} \left(\frac{R}{\text{m}} \right)^{1.97} \left(\frac{a}{R} \right)^{0.58}$$



第1次作业

刘斌《力学》第2版, 习题1-5、1-15、1-21、1-27、1-30、1-45、1-50、1-53