

Lecture 3: Experimental measurements

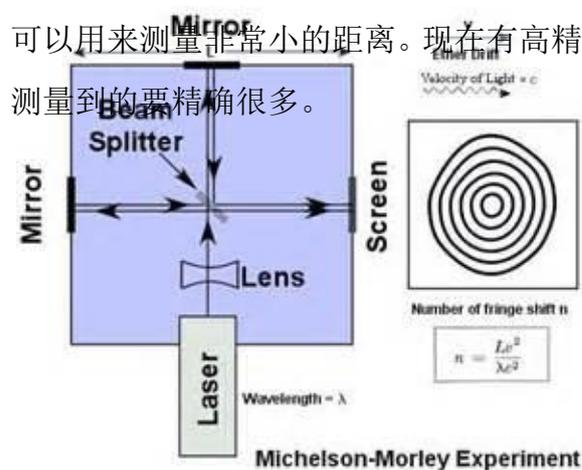
(chpt 5, Feynman)

Importance of measurements

物理学的方法，也就是现在的科学方法。科学方法里的第一步是观测，或测量。最初人们观察都是用眼睛去看，但是眼睛能看到的比较有限，有很多东西需要仪器才能看到，所以物理学里，做实验，用仪器去看，是最重要的一部分，所以如果问物理学是什么？用一句话概括：物理学是一门实验科学。大多数的物理学家都是实验学家，特别是欧美，很多仪器都是那里发明的。

科学中能够测量，是个非常重要的要求，如果不能测量，就不能算是科学，比如宗教里的很多论断无法测量。第一个系统提出如何进行量化观测的科学家是 Galileo Galilei (1564-1642)。大多数的诺贝尔奖都授予了发明仪器的人，因为只有发明仪器才能观测到很多物理现象，现有的仪器把能看到的都已经看了，很难看到新的东西。

第一位获得诺贝尔奖的 Albert Abraban Michelson,他发明了迈克尔逊干涉仪，可以用来测量非常小的距离。现在虽然有高精度的游标卡尺，但是迈克尔逊干涉仪能测量到的要精确很多。



上图是现代的麦克森干涉仪，用一束激光，打到棱镜上，然后到分光镜把光分成两路，一路向左，一路向上，然后到一面镜子，通过镜子反射的两束光到达

屏幕形成干涉，形成干涉条纹，干涉条纹随着光距离的长短，会发生变化，镜子稍微动一下，干涉条纹也动了，镜子动了只有光的一个波长大小，干涉条纹就要移动整个一条，这是肉眼可以看到的。可见光的波长是 450 纳米~700 纳米，纳米是 10^{-9} ， 450×10^{-9} 是一个很短的距离，也就是说，可以用这个仪器来测光波的波长那么小的距离。

在物理学上我们要进行测量的东西很多：比如距离，时间，速度，在热力学里用温度计来测温度，压强；东西的重量或质量，能量，功率，声音的大小；光的话要测亮度，遥远的用望远镜；材料里有杂质，比如水里加了糖，我们要把糖的成份测出来，再比如去医院检查身体，抽了血，通过化验，把血液里各种成份测出来；讲到电磁场的时候，我们要测电磁场，电流，电阻电容等；核反应时还要测放射性等等。所以测量是一个非常广泛的区域。

有个非常有名的国际机构定标很多的测量，这就是美国国家标准与技术局 ANSI (National Institute of standards and Technology)，中国也有计量局，计量局的工作就是研究如何把每样东西测量得更精确，并制定测量的标准。

我们回顾一下，当时伽利略是怎样用测量的办法来研究物理学的规律的：

Galileo's inclined-plane exp.

假如有个光滑的斜面，顶端放个小球，放开小球，小球就会下滚，假如你从来没有学过物理学，也不知道什么科学，要研究这个球下滚，可以做两件事情，一是对这个斜面标上标度，也就是长度，二是要有个办法能测量小球滚了多长时间，然后我们看一个时间单位滚了多远。伽利略当时测量时间是用的脉搏，不管你用什么单位作为时间和距离，你都会发现距离和时间的平方成正比

$$D \propto t^2,$$

这在当时是一个新的发现。科学研究的乐趣就是你找到一个东西，别人都不知道，只有你知道。

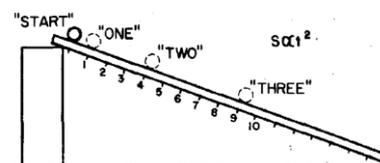


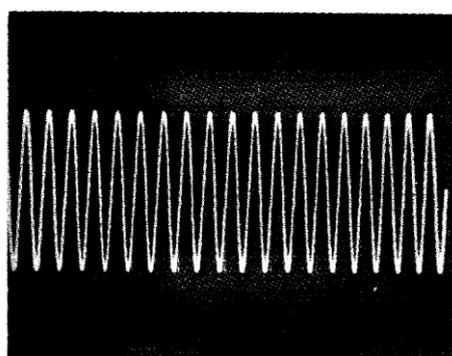
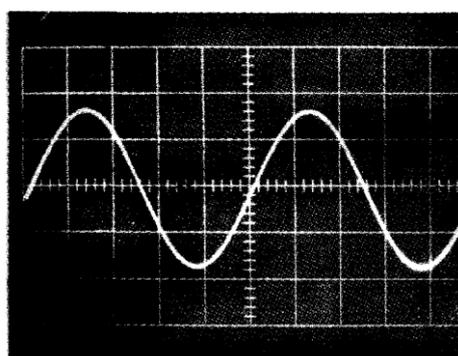
Fig. 5-1. A ball rolls down an inclined track.

时间的测量：

如果有很多事情不断的在发生，就像伽利略当时利用的的脉搏，我们就可以用它来作为时间的量度。类似的事情有很多，最常见的是日升日落，月盈圆缺。伽利略观察到摆长相相同的单摆，运动起来每晃一次的时间是相同的，于是可以用

它来计时。如果定义一天为 24 小时，每小时为 60 分钟，每分钟为 60 秒。那么制作一个单摆，让它一天振动 $24 \times 60 \times 60 = 86400$ 次，那么这个单摆每振动一次所用的时间就是 1 秒。

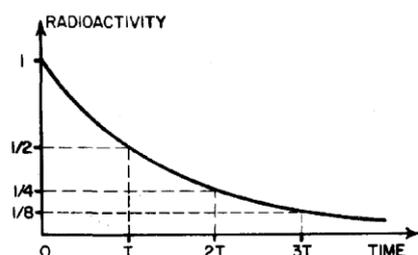
如果想要测量比秒更小的单位，则一定要发明一个单摆，在一秒内要晃动很多很多次。后来人们搭一个电路，电路里有电阻，电容，加上电池等，电流的来回流动也像一个单摆的振动，不过这个电路里电流的流动就比单摆快多了，所以



可以用电路来做一个钟。

用示波器可以清楚地看到电流随着时间的变化是周期性的。不同的电路，参数不同，周期也不同。这样的话就可以把一个长的周期变得越来越短，时间测得越来越精确，目前人们可以达到的最大精度为 10^{-12} ，即万亿分之一秒，这在平时生活中微不足道，但是在科学上是非常有用的。

更精确的还有原子钟。在原子中，电子是周期性转动的，绕着原子核转一圈就是一个周期性的运动。人们从 60 年代开始研究原子钟。现在最好的原子钟可以达到 10^{-16} 的秒的精度。过去用的原子钟用的波长比较长，相当于是微波的原子钟。现在要更精确，那么波长就要更短，就用到光频的原子钟。这个精度相当于宇宙发展到今天，在 130 亿年里，误差只有一秒。要做非常精确的原子钟，就要学习低温技术，要学习相对论，因为在这个精度的范围内，相对论就变得非常的重要。



而粒子物理学家测量的最短的时间，是一个粒子的寿命。这个时间是根据它衰变的规律来测量的。对于相互作用粒子典型的衰变时间为 10^{-24} 秒，这差不多是光穿过原子核所需要的时间。Higgs 粒子的寿命为 1.6×10^{-22} 秒。

它的寿命是如何测量出来的呢？粒子衰变有一个非常简单的规律，比如有 10 个粒子，它们的衰变是随机的，不是同时发生的。如果经过一段时间变成 5 个了，那么这个时长就是它的半衰期，5 个变成 2.5 个，就又是一个半衰期。利用这个办法可以来测量比较长的时间。核物理学家发明了一种放射性年龄检测。炭 14 是一种同位素，它只有在宇宙线的不断冲击之下才能产生，如果埋到地下就不能产生了。所以当我们挖出一个木乃伊，根据检测炭 14 的含量，就可推算时间。炭 14 的寿命是 5000 年，所以我们可以测几千年的。还可以用 ^{238}U 来测量地球和太阳的寿命。宇宙的年龄为 130 亿年，这是通过对宇宙的尺度观测而得来的。一些基本粒子的寿命非常长，如 ^{136}Xe ，它的寿命为 10^{21} 年。质子的衰变时间是目前所知最长的，我们只能大约给出一个下限：不低于 10^{35} 年。

Distance measurement

长度的测量：

- Finger span, foot, steps, height..., Sizes related to human being

Harvard bridge: xyz Smoots + 1 ear 长度的测量单位可以是任意的。比如可以用手指间距、步长、身高等等各种与人类有关的量。哈佛桥（也被当地人称为麻省理工学院桥，马萨诸塞大道桥），是连接波士顿和马萨诸塞州剑桥镇的钢托臂梁桥。1958 年，五个很喜欢恶搞的 MIT 学生组织了一个活动，决定利用其中一位同学 Oliver R. Smoot 的身体，丈量一下波士顿哈佛桥的长度。四个人齐心协力，把 Smoot 的身体象个大风车一样，头接着脚，脚接着头的从桥头转到了桥尾。最终测得桥的长度是 364.4 Smoots，再加他的一只耳朵长度作为误差。随后他们每隔 10Smoots 用绿色的油漆在桥上做了标记，并把"364.4 smoots plus one ear"得意地标注在了桥头。（注：其中漏了"or minus"）。在国际制单位中使用米作为长度单位。

测量长度的方法也有很多，除了直接测量外，很多时候使用间接测量。比如测量一座大楼或者一座山的高度，就会使用三角测量法。如图所示，知道了两个角度和三角形的底边长，就可以算出三角形的高。

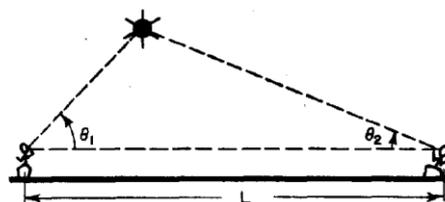
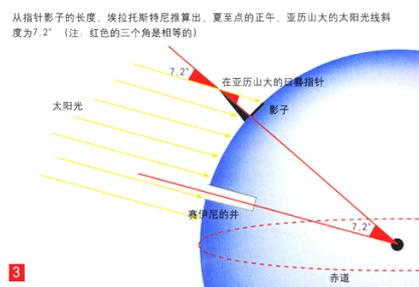


Fig. 5-4. The height of a Sputnik is determined by triangulation

Astrophysical measurement

知道了更长距离的测量后，我们可以进行天文学的测量，比如怎么测量地球的半径呢？其实地球的半径，在公元前就有人已经知道怎么测量了。希腊天文学家埃拉托斯特尼（Eratosthenes，公元前 280~前 190 年），他的试验比较复杂。



埃拉托斯特尼认为，在赛伊尼（Syene），即位于今天的亚历山大以南的阿斯旺（Assuan），在夏至日的正午，太阳差不多经过天顶：他知道窄窄的井底被照亮。而在亚历山大，情况就不一样了，影子不可能消失，即太阳总是斜射的。他观察了日晷指针（或一根竿子）的影子，而且他还知道太阳射到地球上的光线是平行的，通过计算影子和指针的长度关系，他得出结论：正午时分，在亚历山大，太阳光会与地面的垂直线有一个 7.2° 的夹角，相当于地球圆周角的 $1/50$ ，大家可以考虑还有哪些方法可以测量地球的半径？

Read more : http://www.ehow.com/how_5895686_radius-earth.html

知道了地球的半径，我们又如何测地球到太阳的距离，和地球到月亮的距离？地球到星星的距离就更加难测了。如果知道了地球到太阳的距离，可以用光行差的办法来测量地球到星星的距离。星星在冬天和夏天是在不同的位置，如果是非常遥远的星星，应该是固定不动的，但是地球绕着太阳在转，知道地球到太阳的距离，用三角形的办法，就可以测出到星星的距离。正是这个办法，天文学家发明了一个新的单位 Par sec。如图所示，当张角正好是一秒时，距离就定义为一个 Par sec。由于宇宙的广大，使用米作为单位就太小了，于是天文学家使用了更长的单位。包括：光年=光走一年所走的距离；Parallax (par sec = 3 光年)；AU=地球到太阳的距离。

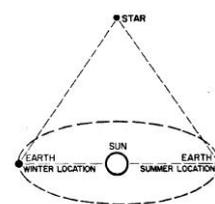


Fig. 5-5. The distance of nearby stars can be measured by triangulation, using the diameter of the earth's orbit as a baseline.

对于比较近的星星，用这个方法还是很有效的，但是很多星星太远，冬天和夏天看上去都在一个地方。这时候就可以研究星星的亮度，通过亮和暗来测量距离。Saul Perlmutter; Brian P. Schmidt; Adam G. Riess 利用了一种超新星，本来有两个离得很近的恒星，其中一个不断的向另一个输送物质，于是这个星星越来越大，等

长到一定的大小，它就会爆炸，而且爆炸时其大小都是一样的。这样不管这种超新星有多远，爆发时其亮度都是一样的，但在不同距离看时所看到的亮度是不同的。所以他们就用这个办法来测量星际距离。通过距离的测量，发现我们的宇宙在加速膨胀。由此他们获得了 2012 年的诺贝尔奖。

刚才是很长的距离测量，现在来看很短距离的测量。测量短距离的第一个重要的突破是光是波的概念。知道光是波后，用干涉仪可以测量 500 个纳米的距离。如利用牛顿环可以测量镜片在这个尺度下的平整度。如果要测更短距离，就用更短波长的光，x 射线的尺寸和原子差不多，这就是为什么用 x 射线可以去看原子的结构。

更多的测量

物理学中还需要测量很多的量。比如温度的测量，如何测量物体的冷热程度。速度的测量，除了日常看到的物体运动速度外，光速、原子的运动速度应该如何测量。电场和磁场应该如何测量。各种基本常数应该如何测量等等。

Lecture4: relationship between physics and other fields of sciences

物理学与数学、化学、生物、工程、金融、社会科学等其他学科有着紧密的联系。

物理学与数学

一般认为物理学是科学，而数学不是。这是因为物理学是研究物质世界的变化规律，而数学的研究对象可以脱离物质世界。数学的出发点是定义和公理，通过逻辑推理得到各种定理、推论。不需要做观测、也不需要证伪。但是对于物理学来说，数学可以作为非常有用的语言。

当涉及到定量物理学的时候，需要用数学来定义和计算各种物理量。比如如何描述粒子受力后运动的轨迹就需要用数学方程来表达。几乎所有的物理定律都可以用数学方程来表达，特别是微分方程。理论上，有了方程就可以通过解方程来探索相关的物理。物理方程通常是简洁而优美的。

很多的数学是应物理发展的需求而发明出来的，比如微积分的发明是力学的需求。反过来，数学又带来了大量的物理发现。但是到目前为止对于一些艰深的物理学来说我们依然没有足够的数学来描述。

应当注意的是物理虽然需要大量的数学，但物理不是数学，也不是数学公式的堆砌。在中国，很多传统教学将物理变成了数学练习。这是偏离了物理的方向的。

物理与计算机科学

计算机科学包括了软件、硬件等等方面。

在硬件方面与物理学的关系很大，计算机芯片的发展是随着电磁学、量子力学、半导体物理等物理学科的发展而发展起来的。目前集成电路的基本单元做的越来越小，接近于极限。因此需要寻找新的硬件支持，而量子计算机、光子计算机就是很有希望的发展方向，这也是目前物理学的前沿科研内容。

在软件方面与算法、逻辑分析、计算数学、信息科学等有着密切的关系。

通过软硬件的结合，计算机可以完成大量的计算，并且随着计算机的发展，今天的计算机可以计算的东西变的非常多，速度也很快。因此对于物理研究有着重要的作用。在物理学研究中有大量的微分方程，而多数方程的求解是很困难的。计算机可以帮助我们进行数值和解析求解方程。对于某些难以做实验或者实

验成本较高的物理学研究计算机模拟成为一个不可或缺的研究方式。在现代物理学中计算物理学已成为重要的专业方向。但在当今中国，这一方面的研究还显薄弱。

物理与化学

最早化学在研究物质成分的分类与化合反应。随着研究的深入，化学涉及到原子和分子间的相互作用。这些相互作用是由量子力学所控制的。因此有了量子化学。现代化学与物理学密切联系到一起。例如当年卢瑟福发现原子结构获得的诺贝尔化学奖。

物理与生物

现代生物学也已涉及到分子原子层次。在这方面做研究的不少生物学家是物理出身。物理学已大量应用于生物学研究中，例如蛋白质折叠的研究就是一个典型物理课题。生物学中发展出理论生物学方面，在这其中物理学起着重要作用。很多大学物理系中都有生物物理学研究方向。

物理学与天文学

天文学的历史与物理学一样悠久，可能更悠久。物理学的一些基本定律来源于天文学的研究，如万有引力定律。光学的发展与天文学也有着紧密的联系。意大利天文学家、物理学家伽利略 1609 年发明了人类历史上第一台天文望远镜。他先观测到了月球的高地和环形山投下的阴影，接着又发现了太阳黑子，此外还发现了木星的 4 个最大的卫星。近代射电望远镜的发明又大大推动了天文学的发展。相对论及粒子物理的发展也推动了天文学理论的发展，建立了宇宙学标准模型和星体演化模型。对于超新星、中子星以及黑洞等天体的研究也随着近代物理学的发展有了极大的发展。伴随着天文学观测的深入，人们又发现了暗物质和暗能量的存在，为物理学的发展提供了宽阔的空间。物理学和天文学已融为一体。

物理学与金融学

现代金融学中应用了很多物理学研究手段，如建模、寻找基本规律等等。金融物理学也叫物理金融学，是用统计物理、理论物理、复杂系统理论、非线性科学、应用数学等的概念、方法和理论研究金融市场通过自组织而涌现的宏观规律及其复杂性的一门新兴交叉学科。简言之，金融物理学家将金融市场看作一个复杂系统，把其中的各种数据如个股价格、指数、房价等看作是物理实验数据，力

图寻找和阐释其中的“物理”规律。金融物理学的英文为 **Econophysics**,是由波士顿大学的物理学教授 **H.E. Stanley** 在 1995 年首先提出的,从而解决了“为什么物理专业的学生可以从事金融学研究并取得物理学位”这一实际问题。

课前预读：

《费曼物理学讲义》I：Chap.5 & 3

《新概念物理教程：力学》：绪论、第一章第 2、3 节