



相对论 1 ~万维钢老师

从今天开始，我们就来讲讲爱因斯坦的狭义和广义相对论。

相对论 1，一个简单的信念

相对论对绝大多数人来说是个神秘的理论。你肯定已经听说过有关相对论的一些有趣的和怪异的结论，比如说，一个物体在高速运动的时候，它的长度会变短，它的时间会变慢。

咱们假设有一个距离地球 40 光年远的星球。光需要走 40 年才能到达那里。那么如果你以 80% 的光速前往那个星球，你得飞行 50 年才能到达那里，对吧？在留在地球的我们看来的确就是这样。如果你出发的时候 20 岁，到达的时候应该是 70 岁吗？

不是。根据相对论效应，高速运动的物体的时间会变慢。寻常的 50 年对你来说只有 30 年，你到达的时候，只有 50 岁！而你要是能以 99.5% 的光速飞行，你的时间将会比我们慢 10 倍！

这也就是说相对论效应可以让人穿越到未来。这个世界为什么是这样的？这不是科幻，而且这还仅仅是开胃菜……相对论，本质上是关于时空的理论——时空跟我们寻常想象的完全不同。正是因为有了相对论，我们才知道有黑洞这种东西，我们才知道空间居然会膨胀，我们才知道宇宙有个起源。

而相对论是一个出了名的难懂的理论。据说爱因斯坦刚刚发表狭义相对论的时候，全世界只有 2.5 个人能理解。等到相对论已经被物理学家广泛接受、爱因斯坦爆得大名，公众又理解不了。我记得欧洲当时还出了一本书叫《一百个反对爱因斯坦的作家》——而爱因斯坦对此的回答是「如果相对论真的错了，有一个人反对就够了。」

那相对论真的这么难吗？你要知道爱因斯坦发表狭义相对论是在 1905 年，距离今天已经 100 多年了。我们没有理由不能理解一个清朝末年就出来了的理论！

所以我就想在咱们《精英日课》专栏用一个小专题的形式，给你彻底讲明白相对论。相对论的数学很简单，但我们重点还是说它的思想。

相对论会对你的世界观产生重大影响。作为一个现代人，如果不理解爱因斯坦相对论，你就错过了这个世界最精彩的东西。一旦理解了相对论，你就不再是以前

的你，你就再也回不去了。但是光知道一些奇妙的结论可不算理解。

我有一个好消息。相对论是简单的。这是一个干净利索的漂亮理论。

但简单不等于容易。简单的东西可以非常深刻。

1. 一个信念

咱们先来考虑一个思想实验。假设你在一艘豪华游轮上旅行，这艘游轮在海上开的速度很快，但是它非常平稳，没有任何颠簸。游轮上有个全封闭的大厅，里面有游泳池有球场，你甚至还可以在里面做物理实验。

那请问，在不和外界发生任何联系的情况下，你能判断出这艘游轮是在前进还是静止不动吗？

你可以做各种实验。比如说把球抛到空中，在静止的情况下，球会落回你的手中。可是封闭游轮里也是这样，球也会落回你的手里。你向游轮前进的方向射门，同在游轮上的守门员只会感到你射门的寻常速度，而不需要考虑游轮的速度。

只要游轮的速度平稳不发生变化，你就无法判断它是在运动还是静止！其实我们生活的地球就相当于是这样一个游轮。地球绕太阳公转的速度是每秒 29.8 公里，比飞机快的多，但因为地球走得几乎是一条直线，你完全感觉不到它正在高速前进。

这个道理，最早是物理学的祖师爷伽利略想明白的。你在速度是每小时 50 公里的游轮上建立一个坐标系研究物理学，我在地面建立一个坐标系，咱俩其实是对等的。你相对于游轮是静止的，相对于我是运动的。你向前射出一支箭，箭相对于你的速度是每小时 360 公里，那相对于我就是每小时 $360 + 50 = 410$ 公里。

不跳出自己的坐标系往外看，你单凭做一个射箭、抛小球之类的实验无法区分运动和静止。匀速直线运动和静止没有本质区别，速度都是相对的。

这个其实就是相对论，这就叫「伽利略的相对论」。



后面咱们讲广义相对论的时候你还会知道，其实不一定是匀速直线运动，加速运动跟静止也没有本质区别……到时候再说。

总而言之，物理学家看破了运动。在物理学家的眼中，运动和静止其实是一回事儿。

2. 看破世间繁华

物理学，有点看破红尘的意思。

以前人们眼中非常不一样的两个东西，物理学家发现它们其实是一回事儿，这是物理学统一世界的一个主旋律。

古人认为大地静止不动，日月星辰都绕着地球做完美的圆周运动。天和地，截然不同。可是后来天文学家精细的观测发现不对，天体运行的轨迹并没有那么完美，很复杂。

结果哥白尼就提出来，说如果你把太阳当做是静止不动，想象地球和其他行星都在绕着太阳做圆周运动的话，你就容易解释以前解释不了的一些轨道。地球，不

是宇宙的中心。

这个日心说就有点看破红尘的意味。哥白尼等于是说地球和天上的那些天体没有本质的区别，天和地是一回事儿！

天主教会受不了这个学说，而物理学的思想解放才刚刚开始。哥白尼那时候人们还以为行星都是做圆周运动，而且是有一些小精灵在推着行星运动……等到天文学家开普勒的时候，他就提出行星绕着太阳转的轨道并不是完美的圆形，而是一个椭圆。开普勒甚至已经提出行星不需要什么精灵推着走，只要太阳给行星一个吸引力就行。开普勒，把行星给看破了。

等到牛顿一出手，就把引力也给看破了。牛顿说不但太阳和地球之间有引力，地球上的所有有重量的东西之间也都有引力。引力普遍存在，天上和地上真的是一回事儿。

这几次「看破」之后，当然还得再结合数学方程和天文观测，物理学就成了一个非常成功的理论。咱们看看「牛顿三大定律」中的前两个——

第一定律说是在没有外力的作用的情况下，任何一个物体将会保持匀速直线运动或者是静止。匀速直线运动和静止一样，无需外力，无需解释。

第二定律说，力，会改变物体的运动方式。注意这里面有个关键的点，力不是*运动的原因*——没有力，物体本来也在匀速直线运动。力，是*改变*运动的原因。如果是一个理想的光滑平面，上面的一个滚动的乒乓球会一直前进——生活中的乒乓球之所以会停下来，那是因为平面给它提供了摩擦力。一直动不停，无需解释；动着动着停下了，才需要有个原因。

这两个定律都离不开伽利略的相对论。力只能带来*加*速度，单纯的速度跟力无关。匀速直线运动和静止都没有力，所以物理定律在游轮和地面是一样的。

其实你不做实验也能想明白，单纯谈速度真没啥意义。宇宙中你来我往，可能距离地球很遥远的一个星球，跟我们之间就有个特别高的相对速度。那你说，那个天体上的物理定律会和咱们这里有什么不一样吗？不会的。在那里的外星人看来他们是静止的，我们才是在高速运动。

所以相对论是物理学家的一个信念。这个信念也可以叫「不特殊论」：不管你的速度有多快，你的坐标系都不特殊。

这个信念实在太简单也太完美了。完美到简直是宁可海枯石烂，宁可扭转时空，物理学家也不应该放弃它……

3. 「相对论与哲学家」

爱因斯坦的相对论其实是伽利略相对论的延伸。伽利略相对论是说如果你不往自己的坐标系之外看，你做任何抛小球之类的*力学*实验都无法判断自己是运动还是静止——而爱因斯坦相对论则是说，不用限制在力学，你*不管做什么*实验都无法判断自己是运动还是静止。

那你说这句话能有啥问题？相对论这不很容易吗？这简直就是哲学！

还真是这样。哲学家很喜欢谈论相对论。但是物理学家对哲学家有时候是嘲讽的态度。有一套特别厉害的物理学教材叫《费曼物理学讲义》，是大概有史以来最有趣的物理学家理查德·费曼在加州理工学院给本科生讲课的记录。费曼在这个讲义里专门设置了一个小节，叫「相对论与哲学家」。

费曼说，有些哲学家把相对论想的特别容易。哲学家听说了相对论的这个信念，就觉得这对我们哲学家来说不是明摆着的原理吗？不跳出自己的坐标系你当然不知道自己是运动还是静止！物理学家折腾半天，结果还不是我们哲学家等候多时了吗？

是吗？相对论如此平凡吗？哲学家坐在家里喝着茶就能想出来吗？牛顿以后的物理学之所以不叫哲学了，就是因为物理学不是坐在家里就能想出来的学问，物理学家靠的是数学、实验和观测。

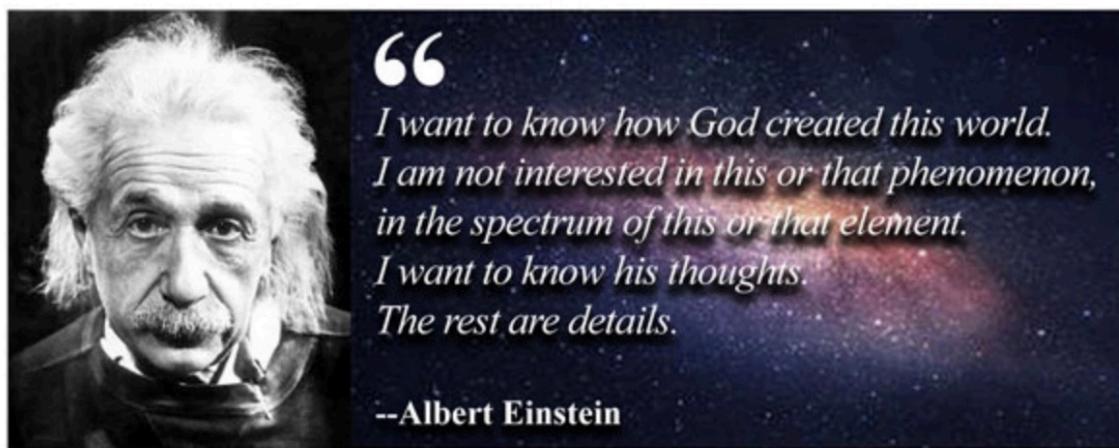
接下来我们要讲的事实，足以让费曼嘲笑那些哲学家。因为它足以让所有人——包括你、哲学家和物理学家——都目瞪口呆。

这件事就是光速在所有坐标系下是一样的。

咱们再回到游轮。假设站在游轮上的你不是向游轮前方射出一支箭，而是用手电筒打出一束光，你猜这束光的速度应该怎样。相对于你来说，光速是每秒 30 万公里。

那既然你跟站在地面上的我的相对速度是每小时 360 公里——也就是每秒 0.1 公里，根据刚才伽利略的算法，我眼中这束光的速度就应该是每秒 30 万.1 公里，对吧？

物理学家发现，不是这样的。不管你跟我的相对速度有多快，我测量和你测量这束光的速度*都是每秒 30 万公里*！



可这怎么可能呢？我们这个世界怎么会是这样的呢？

这件事，哲学家坐在家里喝多少茶都发现不了。你之所以觉得它怪异，只不过是因为你生活的范围实在太小了，你的见识太有限了。

有些信念可以坚持，但是别忘了，有些常识是错的。咱们下一讲再说。

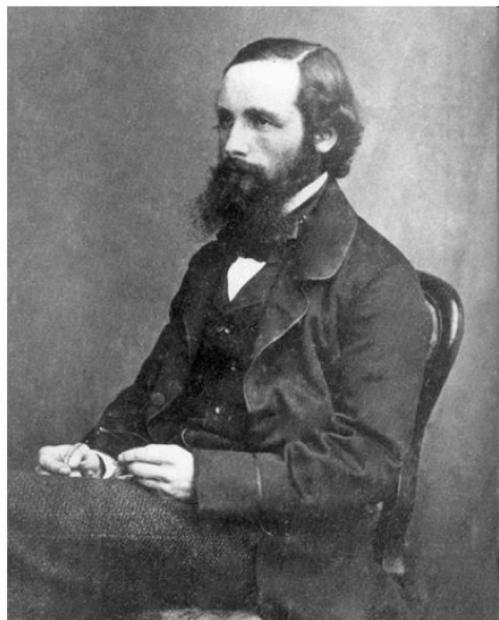
相对论 2~万维钢

相对论 2~英雄与危机

物理学这个学科的一个特点是有太多的英雄人物。如果你不理解他们都干了什么，对物理学家保持不明觉厉、敬而远之的态度，你完全可以踏踏实实地过好这一生。可是如果你一旦真正理解了这些英雄做的事情，你可能就再也不愿意老老实实地享受岁月静好了。你可能会「一见杨过误终生」。

在讲爱因斯坦的丰功伟业之前，咱们先说另外一个英雄，英国物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦。麦克斯韦统一了电磁学。这个工作有多了不起呢？费曼是这么说的——

「从人类历史的长远观点来看……几乎无疑的是，麦克斯韦发现电动力学定律将被判定为 19 世纪最重要的事件。与这一重要科学事件相比，发生于同一个 10 年中的美国内战，将褪色而成为只有区域性的意义。」



James Clerk Maxwell
Scottish 1831-1879

"From a long view of the history of mankind – seen from, say, ten thousand years from now – there can be little doubt that the most significant event of the 19th century will be judged as Maxwell's discovery of the laws of electrodynamics. **The American Civil War will pale into provincial insignificance in comparison with this important scientific event of the same decade.**"

– R.P. Feynman

麦克斯韦干的这件事，可以吹好几辈子。今天我把这个事儿给你讲一讲，我都感觉与有荣焉。你如果能把这个工作给听懂，你也会有一种自豪感。

这件事直接导致了爱因斯坦相对论的创立。整个过程好像是一个奇幻电影。一开始大家本来过着寻常的日子，突然就有人弄了个大事件。因为这个大事件，人们就意识到这个世界有点不太对。你抓住这一点点不对，仔细追究下去，你就打开一扇大门。这扇大门一打开，寻常的日子就不存在了，影片从此进入奇幻世界……然后你就期待续集吧。

咱们先从寻常的物理现象说起。

1. 一点电磁学

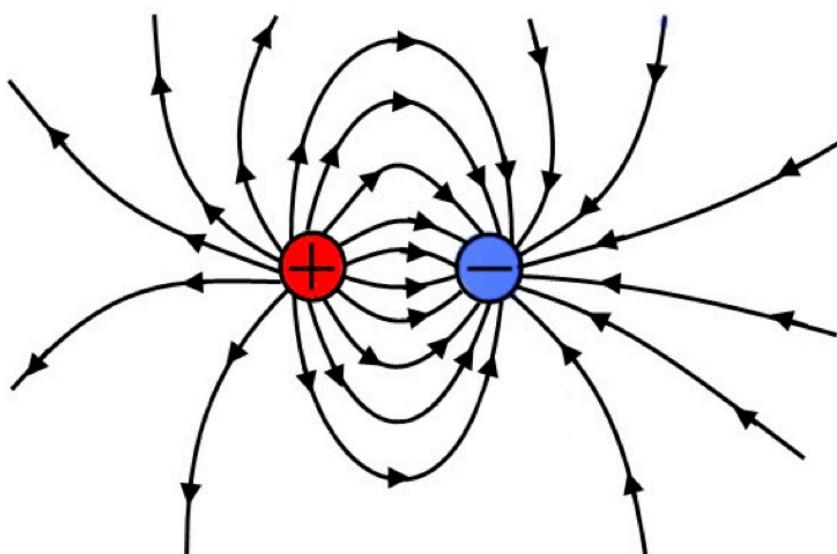
我们在生活中能接触到的物理现象其实就那么几种。你搬运东西、测量一个什么运动的速度，那是力学；你能看到周围的事物，欣赏各种颜色，那是光学；你家里的一切家用电器，几乎都来自电磁学。

电磁学并不神秘。什么是电呢？电就是电荷之间的相互作用。电子带负电，离子带正电，电子跟离子之间就有一个吸引力，而两个电子或者两个离子之间就有一个排斥力，也就是同性相斥，异性相吸。

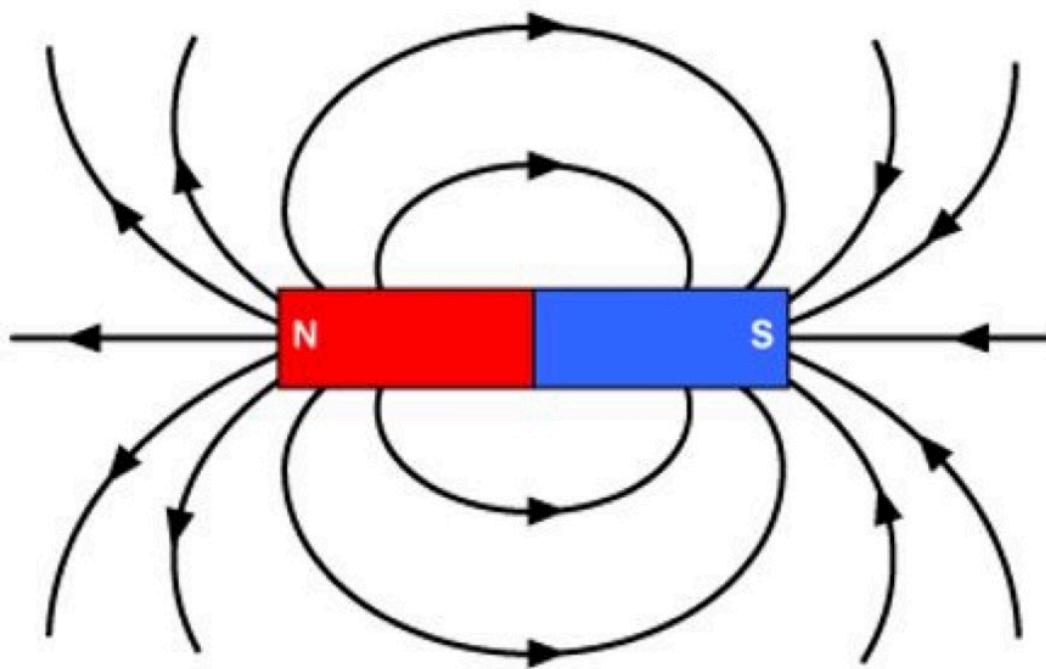
那什么是磁呢？磁来源于电，是电荷的运动产生磁。一段导体中有电流，它周围就会有磁性。像我们平时看到的磁铁，也无非就是其中原子排列的很整齐，每个原子周围电子的运动带来的磁力。

而如果用物理学家的眼光理解电磁现象，你必须得掌握一个概念，叫做「场」。

两个电荷之间发生吸引，请问这个吸引力是怎么感觉到的呢？难道一个电荷*隔空*就能感到另一个电荷的存在吗？这里边可没有什么「超距作用」。每个电荷都会在自己的周围形成一个「电场」，另一个电荷不是跟这个电荷直接发生相互作用，而是跟这个电荷的电场发生相互作用——



图中那些带箭头的曲线就是电场的形状和走向。类似地，磁力，其实也是以「磁场」的形式在周围空间存在——



图片来自 electricalacademia.com

确切地说，是所有的电场和磁场重叠在一起，形成一个总的电磁场，然后各个带电物质根据自己所在位置的电磁场来决定自己怎么运动。

电磁场可不是物理学家的想象，而是客观存在的东西，你完全可以用仪器探测出来。我记得爱因斯坦曾经有一句话说，「场，就好像我坐的这把椅子一样真实。」当然现在有些神神叨叨的人说气功高手能体察到「能量场」、名人的周围有「气场」，那些「场」就不是电磁场了。

好，现在麦克斯韦出场。

2. 麦克斯韦的壮举

麦克斯韦之前的物理学家已经对电磁现象做过各种研究。特别是法拉第，在实验室里发现，变化的磁场所能够带来一个电流，也就是说「磁能生电」。像这些电磁现象都很有意思，你完全可以编写一本书，列举科学家已有的电磁学知识——但是这些知识有点杂乱无章，就好像一本写满了各地风土人情的菜谱。

麦克斯韦要做的事情，有点像是一位好学的武林高手，博采众家之长，融会贯通之后，创立了自己的武学。

这门学问不但是一统江湖，而且还推演出一些前人根本没想到过的新物理来。

1860 年代初期，麦克斯韦提出一组总共四个方程，来描写*所有的*电磁现象。这就是著名的麦克斯韦方程组，它们写出来非常漂亮——

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

前三个方程分别说的是（1）电荷产生电场；（2）没有磁荷；（3）变化的磁场也能产生电场。第（4）个方程右边的第一项说的是电流产生磁场，所有这些都是当时已知的物理知识。

我们重点说说它的第二项。这一项就是麦克斯韦的独特发现。一方面，是麦克斯韦考虑电和磁之间应该有一个对偶的关系。那既然法拉第的实验证明变化的磁场能产生电场，变化的电场是不是也能产生磁场呢？另一方面，这一项也是让方程组在数学上自洽、让电荷数守恒的要求。这一项，就是说变化的电场也能产生磁场。

后来人们用实验证明麦克斯韦是对的。但是请注意，麦克斯韦这个发现纯粹是理论推导出来的！这就好比说一个侦探，听取了各方的信息之后突然就推断出来一个人们意想不到的结论。而麦克斯韦用的仅仅是数学。

好，现在麦克斯韦知道——

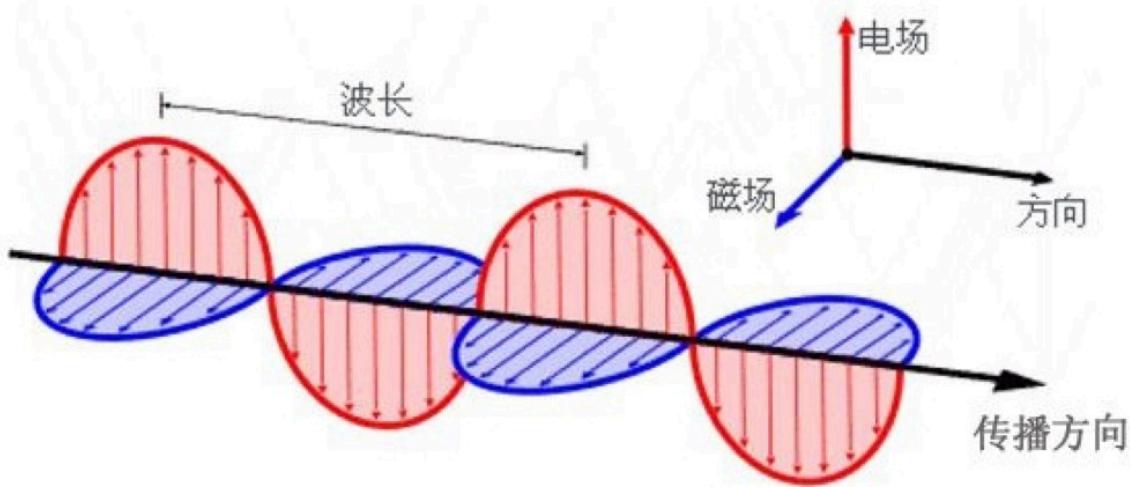
* 变化的磁场能产生电场

* 变化的电场又能产生磁场

那首先你就能看出来，电和磁其实在某种程度上是「一回事儿」，电场和磁场可以互相产生，就算没有电荷，用磁场也能产生电场。

但麦克斯韦紧接着想到，如果我用线圈弄一个震荡的电流，产生一个周期变化的磁场，那么这个周期变化磁场就能产生一个周期变化的电场，而这个周期变化的电场又能产生新的周期变化的磁场……以此类推，岂不是说这个电磁场可以一直传播下去吗？

这就是电磁波！二十多年以后人们真的在实验中制造了电磁波，给后世生活带来巨大的影响，不过麦克斯韦在意的不是电磁波的实用价值。



图片来自 <http://toutiao.sanhao.com/news-detail-23997.html>

麦克斯韦可以用他的方程组直接计算这个电磁波的传播速度。他算出来电磁波速度，发现跟光速，它们的数值是一样的！

光是有速度的。你打开一盏灯，光线不会瞬间传播到宇宙的另一头去。当时的人已经在实验中测量了光速。而且早在 1801 年人们就已经知道光是一种波。但是人们并不知道光到底是怎么回事。

而现在麦克斯韦计算得出的电磁波的速度正好是光速，于是麦克斯韦大胆宣称，光，其实就是电磁波。后来人们证实果然是这样，我们平时所见的可见光无非就是特定频率的电磁波而已。

这是物理学家再一次看破了红尘。天上的东西和地上是一回事儿，匀速直线运动和静止是一回事，电和磁是一回事儿，而现在麦克斯韦说，光跟电磁场，其实也是一回事儿。

这么一来，物理学的逻辑结构就变得更简单了。牛顿力学加上麦克斯韦电磁学，身边的一切物理现象等于是都被理解了。这绝对是英雄的壮举。

但是这个成就里边有一个危机。

3. 危机

咱们先捋一捋麦克斯韦的发现——

1. 他用四个方程概括了所有电磁现象；

2. 他发现变化的电磁场可以互相产生，从而推导出电磁波；
3. 他计算出电磁波的速度正好是光速，从而说明光其实就是电磁波。

现在我们知道了，光速，是电磁现象所要求的结果，是可以用数学计算出来的。

那好。请问，你麦克斯韦计算出来的这个光速，是*相对于*谁的呢？

从逻辑角度，你不能脱离坐标系（或者叫「参照系」）谈速度。

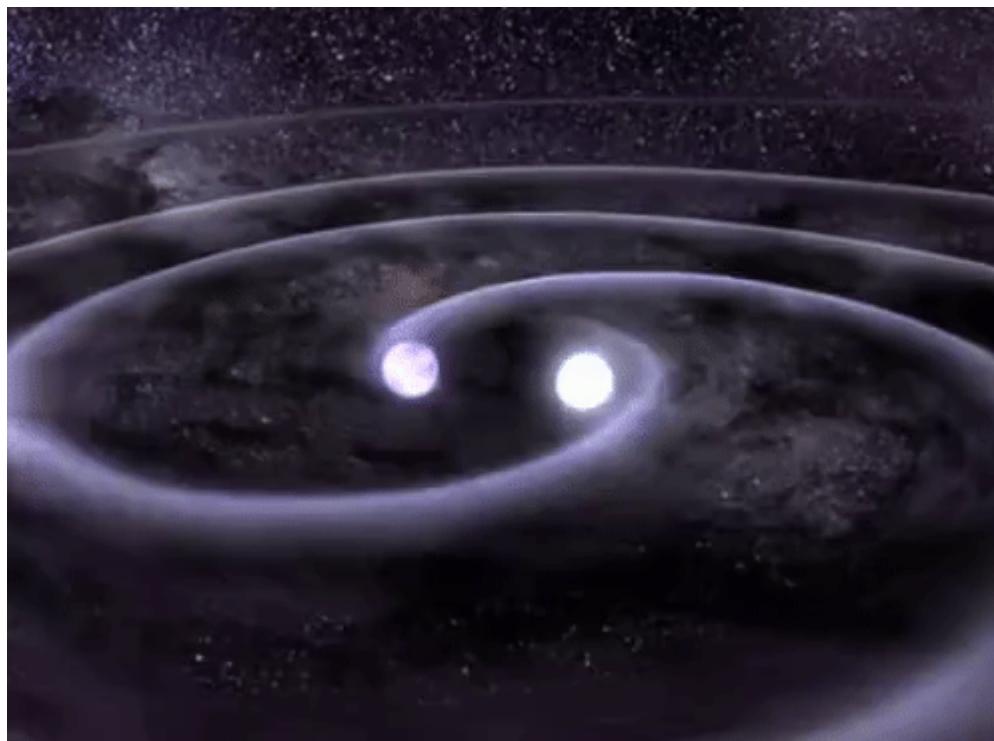
比如说，你站在一艘快速行驶的船上，船的速度是每小时 50 公里。你在船上射出去一支箭，你平时射箭的速度是每小时 100 公里，那这个「每小时 100 公里」就是相对于船上的你来说的。

而相对于站在岸边的我来说，箭的速度就应该是每小时 $50+100 = 150$ 公里，对吧？速度都是相对的。

那麦克斯韦方程组解出来的光速是相对于谁呢？这个问题可以有两种答案。

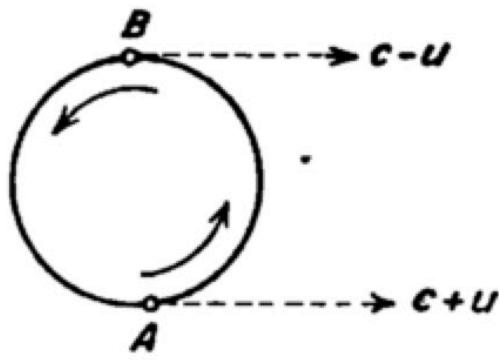
老百姓的直觉是，光速肯定是相对于光源的。你打开手电筒射出去一束光，那这个光速肯定是相对于手电筒啊——但是这个说法很快就被物理学家给否定了。

宇宙中有一种「双星系统」，就是两个临近的恒星互相绕着对方旋转，谁也离不开谁。从我们这里观察，就总有一颗恒星在向着我们运动，另外一个恒星向着我们相反的方向运动——



两颗中子星的双星系统，图片来自 <https://gfycat.com/gifs/detail/crazywarmaruanas>

如果光速是相对于光源的速度，那么向我们走的这个恒星的光速就应该更快一点，离我们而去的恒星的光速应该更慢一点——



图片来自 <https://skeptics.stackexchange.com/questions/9712/evidence-for-the-absolute-speed-of-light>

这个速度差异并不大，但是因为双星距离我们十分遥远，星光到达我们需要的时间就很长，这一点点速度差异就足以让我们观察到两颗星的星光有一个延迟。

可是天文学家观测了各种双星系统，从来都没有看到任何延迟。两个恒星的光速始终都是一样的！

这说明光速跟光源的速度无关。物理学家对此并不感到惊讶，因为电磁波本来就是脱离最早产生它的电荷和电流而独立存在。波，毕竟不是射出去的箭。

物理学家设想，光其实是遍布宇宙空间的某种介质的波动，而光速就是相对于这个介质的速度……可是当时的人万万没想到，这个解释的问题更大。

咱们下一讲再说。

相对论 3~万维钢

相对论 3 ~ 光速啊，光速

相对论已经到了第三讲，爱因斯坦的理论还没有出场，而我们做这么多铺垫都是值得的。真正的精彩不在于相对论的结论，而在于思辨的过程。前两讲，我们说了两件事。

第一，匀速直线运动和静止没有区别。物理定律——至少是力学的定律——应该在所有匀速直线运动或者静止的坐标系下是一样的。

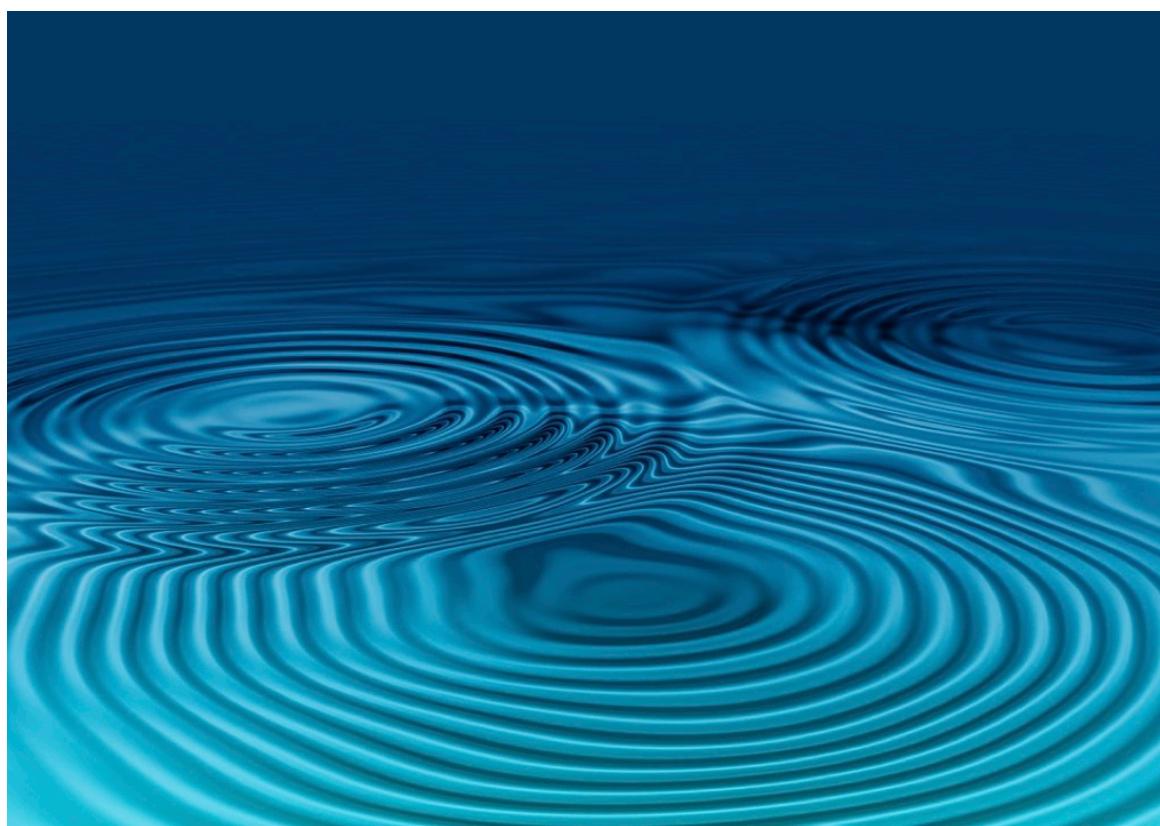
第二，麦克斯韦解方程解出来一个光速，可是物理学家有个疑问：这个光速是相对于谁的呢？

如果光速是相对于光源的速度，那没问题，这两个事实不矛盾。但是我们讲了，实验观测表明，光速跟光源的速度无关。

于是物理学家相信，光既然是一种波动，光速就一定是相对于某种「介质」的速度。

1. 波动和「以太」

咱们先说说什么叫「波动」。你往平静的湖水里扔一块石头，水面上就会产生一层层的波纹，慢慢传播出去，这就是波动。用我记得教科书上的话说，波，就是「时间和空间上的周期性运动」。



请注意，在波往外传递的过程中，是波的*形态*在传播，但是湖水本身并没有往外传播。湖面上的水有一个局限在当地的来回运动，仅此而已。你看到海浪一层

层地来到岸边，那些岸边的浪花只是岸边的水的波动，并不是远方的水跟着海浪一起来了。

在大尺度上，水并没有动，是波在相对于水而动。水是波传递的介质，波传递的仅仅是信息和能量，而不是物质——介质本身，不需要动。

声波也是这样。距离你十米远的人说话，你能听到他的声音，那是声波在空气中传递的结果。声波从那个人的嘴边到达了你的耳朵——但是那个人并没有把他嘴边的空气给吹到你这里。

好，水波是相对于水面的运动，声波是相对于空气的运动——那既然光作为电磁波也是一种波动，它就也应该是相对于某种介质的运动，对吧？

这个假想中的介质，就被称为「以太」。

并不是物理学家观察到过以太的蛛丝马迹，也不是物理学家固执地相信凡是波都必须得有介质——物理学家凭空想象这么一个以太，纯粹是为了回答「光速到底相对于谁」这个问题。

2. 可是没有以太

那以太到底是一种什么东西呢？物理学家可以推算它的性质。

首先，既然我们能看到来自宇宙各处的星光，以太就必须遍布整个宇宙空间，无处不在。

其次，以太肯定是一种非常稀疏的物质。这是因为我们完全感觉不到它的存在，各种东西都是该怎么运动就怎么运动，以太不构成障碍。

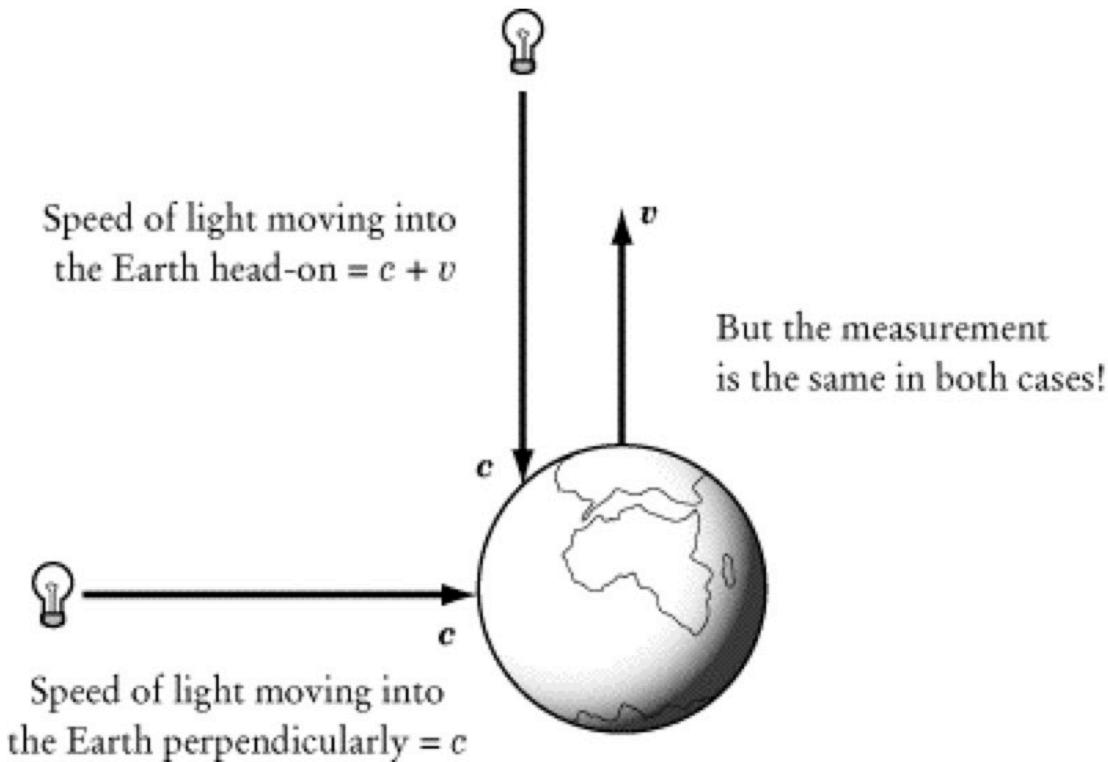
但同时以太又必须得是一种很坚硬的东西。这是因为物理学家早就知道，波的传播速度跟介质的坚硬程度有关：介质越硬，波速就越快，比如声波在水里的速度就比在空气里快。

又很稀疏，又很坚硬，以太这个东西不是太奇怪了吗？

更严重的问题是，如果以太真的存在，那物理学家关于「匀速直线运动和静止没有区别」这个信念，可就错了。我们完全可以说「相对于以太的静止」就是绝对的静止，它跟运动有本质的区别。

咱们还是回到那艘豪华游轮上。你做力学实验的确无法判断船是在运动还是静止，但是现在你可以做一个电磁学实验！你打开手电筒制造一段光线，然后你测量一下它的速度。只要船在相对于以太运动，你就一定能找到一个方向，正好是船运动的方向，在这个方向上，光速比其他方向要慢一些！那只要你能找到一个光速变慢的方向，不就证明船是在运动了吗？

我们的地球就是这艘船。既然地球在公转，它就肯定是在运动。那如果以太存在，我们就一定能找到一个让光速或者稍微变大、或者稍微变小的方向，对吧？



这是一个关于以太到底存不存在的重要性的判据。我们知道地球公转的速度大约是每秒 30 公里，可是光速是每秒 30 万公里，公转对光速的影响是非常非常小的，但是这难不倒物理学家。

美国物理学家阿尔伯特·迈克尔逊 (Albert Michelson) 发明了一个特别漂亮的测量光速变化的方法。他把一束光分成两束，在垂直的两个方向前进，走过同样的距离，经过镜子反射之后再回来。如果光速在两个方向上是一样的，两束光就会形成一个完美的干涉条纹。但是只要这两束光的速度有一点点不一样，这个干涉条纹也会被破坏。这个装置足以发现极其微小的速度差异，现代人发现引力波的实验装置也是用了这个原理。

这就是发生在 1887 年的「迈克尔逊-莫雷实验」。实验结果是地球上的光速在所有方向上都是一样的。

这也就是说根本就没有以太。

这也就是说光根本不需要介质，就能在空间传播。

这也就是说匀速直线运动和静止还真是没有本质区别。

但这也也就是说，物理学家还是不知道光速到底是相对于谁的。

1887 年，全体物理学家都陷入了困惑。他们还得再等 18 年才能知道答案。而提供答案的人，现在才只有 8 岁。

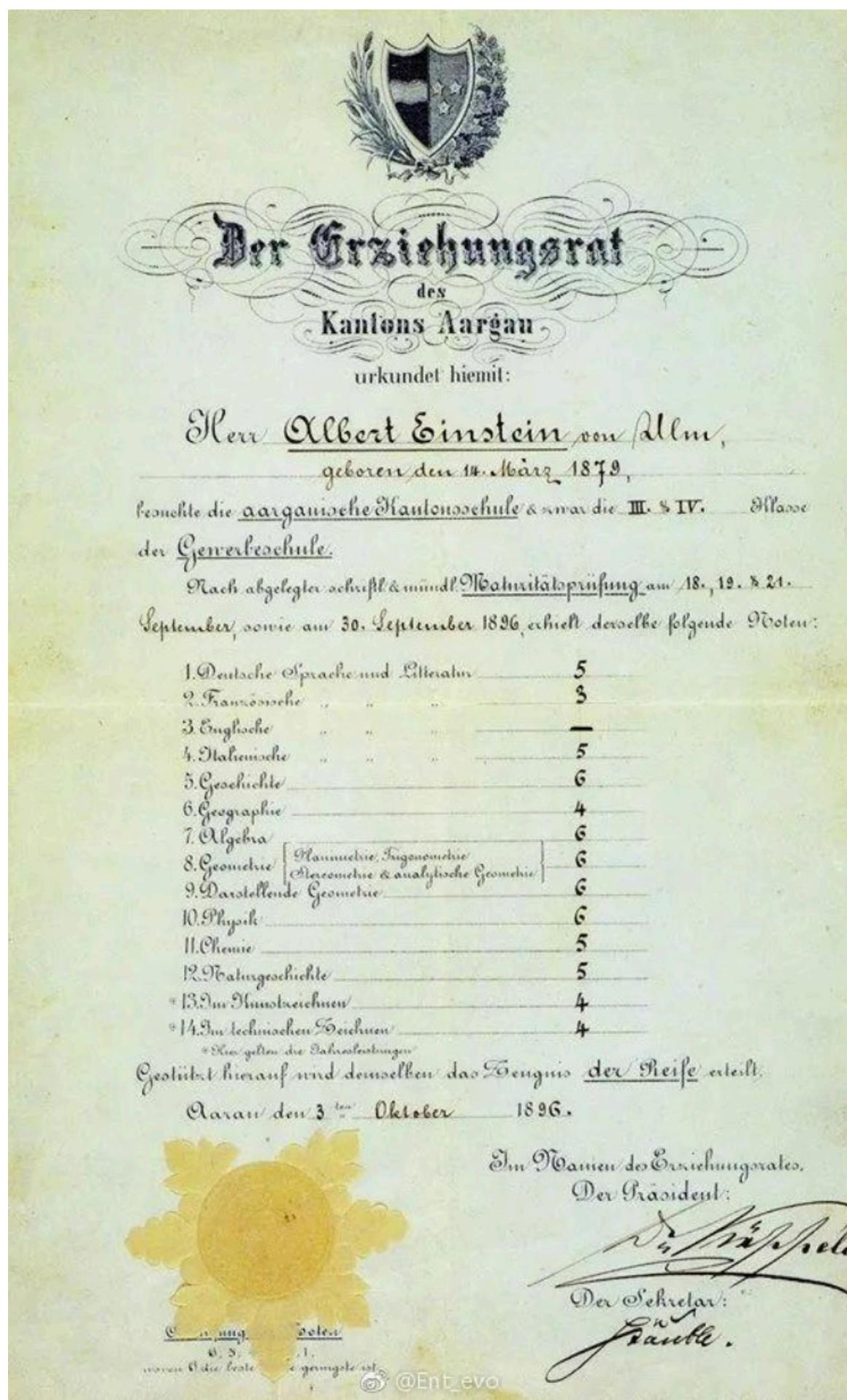


三岁的爱因斯坦。本期所有爱因斯坦的照片来自维基百科。

3. 二十六岁以前的爱因斯坦

关于爱因斯坦有一些民间传说。很多人有个印象，说爱因斯坦小时候学习不好，好像是个有点笨的孩子，后来他努力学习，才成了伟大的科学家。这样的故事能给普通人希望……但是爱因斯坦真不是普通人。

2017 年，诺贝尔奖委员会在官方 Twitter 账号（@NobelPrize）上贴出了爱因斯坦 17 岁高中毕业时的成绩单——



他的物理、代数、几何、历史成绩都是最高分 6 分，只有法语最差是 3 分。这些成绩相当不错。我想补充的是爱因斯坦 16 岁的时候就已经报考了瑞士苏黎世联邦理工学院而且被录取了，只是大学要求他先把高中念完。

不过按照世俗的标准来看，爱因斯坦的确有点性格「缺陷」。爱因斯坦对师长不够尊重，还总想对抗体制。比如爱因斯坦本来是在慕尼黑上高中，可是他受不了当时德国高中普遍实行的军事化管理，就索性退学，追随经商的父母去了意大利……而且连德国国籍都不要了。



14岁的爱因斯坦。

爱因斯坦没念完高中就想上大学，上了大学仍然不满意。苏黎世联邦理工学院已经是个很好的大学了，但爱因斯坦认为它的教学太陈旧。我们上一讲说的麦克斯韦的电动力学，这个时候已经出来 40 年了，可是苏黎世联邦理工学院的物理系居然没有这门课程。爱因斯坦干脆就逃课，自学麦克斯韦的理论。

爱因斯坦看不起物理系的教授，教授们也看不上爱因斯坦。他们给爱因斯坦的评价是不听话，而且还懒。他们甚至建议爱因斯坦不要学物理了，去学医吧——对物理学家来说这简直是侮辱。

不过爱因斯坦在大学里有一个重大收获，就是他后来的妻子米列娃。米列娃本来是学医的，是转系学物理……两个物理青年就这样相爱了。

但是两个人的成绩都一般。大学毕业考试的时候，在物理系的总共五个毕业生

中，爱因斯坦排第四勉强拿到了毕业证，米列娃排第五必须重修一年。

当时是 1900 年。排前三名的学生都得到了正式的教职，从此就是职业科学家。而爱因斯坦和米列娃却不得不为生计奔忙。两人又有了孩子，爱因斯坦为了养家糊口还去给人当了一阵家庭教师，后来好不容易在专利局找到了一个低级的工作。

这就是爱因斯坦在 1905 年之前的生活状况。我想有类似这样经历的求学者可以说是不在少数。心中有一个远大的志向，看什么都不顺眼，面对现实毫不妥协，结果把自己生活搞得很艰难……正所谓「诚知此恨人人有」。



1904 年，25 岁的爱因斯坦

爱因斯坦跟这些人唯一的区别是，到了 26 岁这一年，他创造了奇迹。

我最近读到一篇杨振宁先生写的文章，叫《爱因斯坦的机遇与眼光》。杨振宁说爱因斯坦之所以能创造奇迹，首先是他极其幸运：「他生逢其时，当物理学界面

面临着重重危机时，他的创造力正处于巅峰。」

但是光有机遇还不行，因为当时至少还有两个人——洛伦兹和彭加莱——也摸到了相对论的门，但是这两人都没有成功。杨振宁说「洛伦兹有数学，但没有物理学；彭加莱有哲学，但也没有物理学。」那为什么是爱因斯坦打开这扇门呢？因为爱因斯坦有个「自由的眼光」。

爱因斯坦敢质疑当前现状。爱因斯坦不跟体制和解。杨振宁说爱因斯坦这种「孤持 (apartness)」的个性，是他能取得伟大成就的必要条件。

但是你光有机遇和个性也不行。在我看来，爱因斯坦的物理直觉，也许是一种天赋。比如他五岁的时候，就对一个指南针非常感兴趣。小孩对指南针感兴趣很正常，但爱因斯坦的思路不一般——他觉得指南针说明我们所处的这个空间有问题！空间不是各向同性的，居然有一个特殊的方向！

爱因斯坦 16 岁就写了第一篇物理论文，这篇论文的题目就是……《磁场里以太的状态的研究》。他就问了一个问题，说如果我以光速在运动，那我看到的光，会是什么样的呢？难道光会是静止不动的吗？

当时爱因斯坦就说，他认为不会是那样——他说根据麦克斯韦的理论，不管我是什么速度，我做实验弄出光波来，光波还是会以光速在运动。

一般情况下师长们都告诉你要适应世界。爱因斯坦不是来适应世界的。他是来改变世界的。

得到更多 | 以太假说：地球行经承载光的介质以太

以太（Luminiferous aether、aether 或 ether）或译为光以太，是古希腊哲学家亚里士多德所设想的一种物质，为五元素之一。19 世纪的物理学家，认为它是一种曾被假想的电磁波的传播媒质。但后来的实验和理论表明，如果不假定「以太」的存在，很多物理现象可以有更为简单的解释。也就是说，没有任何观测证据表明「以太」存在，因此「以太」理论被科学界抛弃。——维基百科

相对论 4~万维钢

相对论 4~刺激 1905

只要你活得足够长，见识足够广，你就会发现所谓「平凡的日子」，其实是一个假象。我们生活的这个世界非常喜欢搞事情，其中有一些不可思议的大事件。

纳西姆·塔勒布在《随机生存的智慧》这本书里有句话说，100个人里面，50%的财富，90%的想象力，和100%的智力勇气，都是集中在某一个人身上——尽管不一定是同一个人。

这个世界就是这么喜欢不均匀的分布。

1905年这一年，全世界的智力勇气，大约都集中在爱因斯坦身上。

1. 奇迹

现在我们一般把1905年称为「爱因斯坦奇迹年」。我记得2005年的时候，物理学家们还专门组织活动纪念爱因斯坦奇迹年的一百周年——别的名人都是纪念诞辰或者逝世多少周年，而爱因斯坦应该按照奇迹年纪念。

伯尔尼瑞士专利局的助理鉴定员阿尔伯特·爱因斯坦，利用业余时间开展科学的研究，于1905年发表了六篇物理学论文。其中四篇，用物理学家杨振宁的话说，引发了人类关于物理世界的基本概念——时间、空间、能量、光和物质——的三大革命。

1905年6月9日，爱因斯坦发表《关于光的产生和转变的一个启发性观点》。当时物理学家认为光是一种连续的波动，而爱因斯坦在这篇论文里针对「光电效应」这个现象，提出一个解释，说光的能量不是连续变化的，而是一份儿一份儿的——是「量子」化的。这篇论文开启了量子力学。

7月18日，爱因斯坦发表《热的分子运动论所要求的静止液体中悬浮粒子的运动》，解释了布朗运动。人们一直都在猜测世间的物质都是由分子和原子组成的，但是因为分子原子的尺度太小，显微镜根本看不到，一直没有直接的证据。而在将近80年前，英国植物学家罗伯特·布朗用显微镜观察到水面上的花粉颗粒一直在做永不停息的不规则的运动。爱因斯坦这篇论文说，花粉之所以会动，那是水分子的热运动在不停地推它的结果——而且他能据此准确计算水分子的性质。这篇论文是人类第一次实锤证明了分子和原子的存在。

9月26日，爱因斯坦发表《论运动物体的电动力学》，这篇论文就是狭义相对论。

11月21日，爱因斯坦发表《物体的惯性同它所含的能量有关吗？》，这篇论文用狭义相对论推导出现在尽人皆知的公式—— $E = mc^2$ ，并据此说明质量和能量其实是一回事儿。

这些论文实在太革命，它们刚出来的时候都让物理学家有点儿懵。但是短短几年之后，就获得了实验上的证实，并且被普遍接受。到1921年，讲光电效应的那篇论文还得了一个小奖，叫「诺贝尔奖」。

我有时候就想，如果把一个现代物理学家穿越到1905年去，他敢不敢用这个速度发表那些论文，敢不敢一个人独占这么多革命的荣誉——我觉得小说都不敢这么写。

没错，爱因斯坦是专门来改变世界的。

2. 爱因斯坦的断言

不要被爱因斯坦的光环所吓倒！我们一开始就说了，狭义相对论是个简单的理论。

到现在这一步，一切的危机就是一个问题：麦克斯韦电动力学解出来的光速，到底是相对于谁的。实验证明光速与光源的速度无关，而以太不存在，地球上哪个方向的光速都一样。那这件事儿你到底怎么面对。

现在爱因斯坦出手了。

我不知道你小时候学物理的时候想过没有，既然物理定律都能用数学表示，数学如此重要，那所谓物理学，是不是无非就是数学应用题呢？对做题的学生来说，物理题的确很像数学应用题。但是物理学家可不是拿着定律做题的人，他们是提出定律的人。

物理学家做的事情，是你敢不敢对这个世界是怎么回事儿，提出一个假设。然后你再去验证这个假设。

做这件事，除了数学，你还得有智力勇气，你还需要「物理直觉」。爱因斯坦的天赋就在这里。

爱因斯坦提出相对论的论文题目叫做《论运动物体的电动力学》，直接说的就是光速危机。爱因斯坦的解决方案是一个拨云见日的断言——

一切匀速直线运动或者静止的坐标系下，物理定律都是一样的，句号。

这句话叫做「相对性原理」。它是伽利略相对论的推广。伽利略说*力学*在一切匀速直线运动和静止的坐标系中是一样的，而爱因斯坦现在说不用非得是力学，一切物理定律——包括电动力学——都是一样的。

这其实是我们一开头说的那个物理学家的简单信念。而有意思的是，光速不变，可以说就包括在相对性原理之中。不管你是哪个匀速直线运动的坐标系，电动力学都一样，所以解出来的光速自然也都一样，光速

$c = 299,792,458$ 米/秒.

光速是相对于谁的？答案是不管相对于谁，它都是同一个数。物理学家用英文小写字母 c 来代表光速，它不是一个变量，它是一个常量。

这也就意味着，不管你是站在地面静止不动，还是在飞奔的高铁上，还是在以接近光速飞行的宇宙飞船上，当你看到一束光的时候，这束光的速度永远都是 c 。

那怎么会是这样呢？难道不同坐标系下的速度不应该叠加吗？难道我迎着光走的时候光速相对于我不应该更快一点吗？

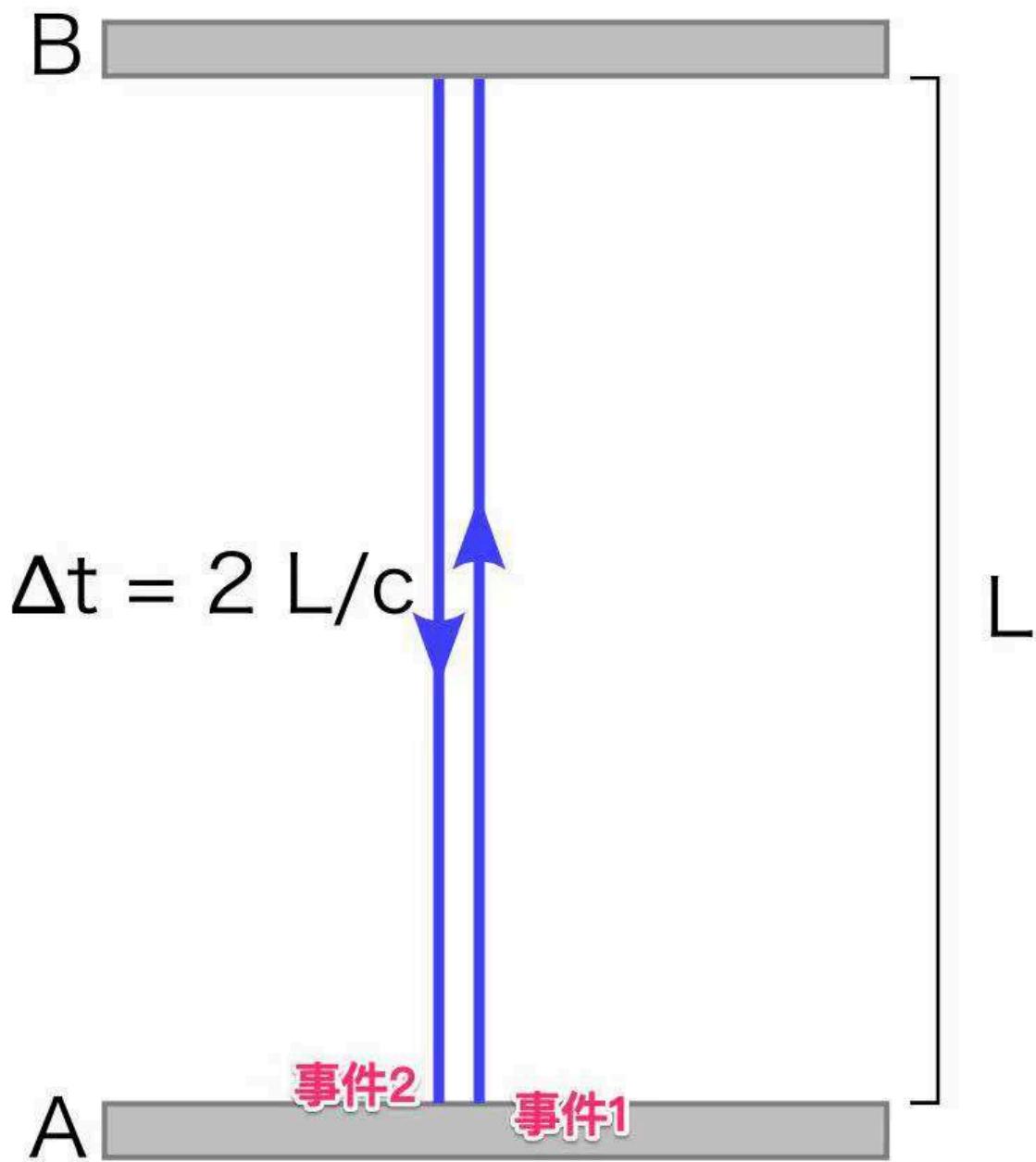
爱因斯坦说，不是。不是光有问题，是你的时空观有问题。

3. 时间的膨胀

只要你坚信相对性原理和光速不变，狭义相对论的各个结论就都可以用数学推导出来。

咱们现在来做一个思想实验，看看真实时空的一个小秘密。

下面这张图中是个长条形的盒子。盒子的一端（A）有一个发射装置，它可以在垂直方向发射一个光脉冲，另外一端（B）是一面镜子。我们要研究的就是光从盒子的一端出来，到达镜子，然后再反射回来，这么一个过程。



图片来自维基百科 https://en.wikipedia.org/wiki/Time_dilation

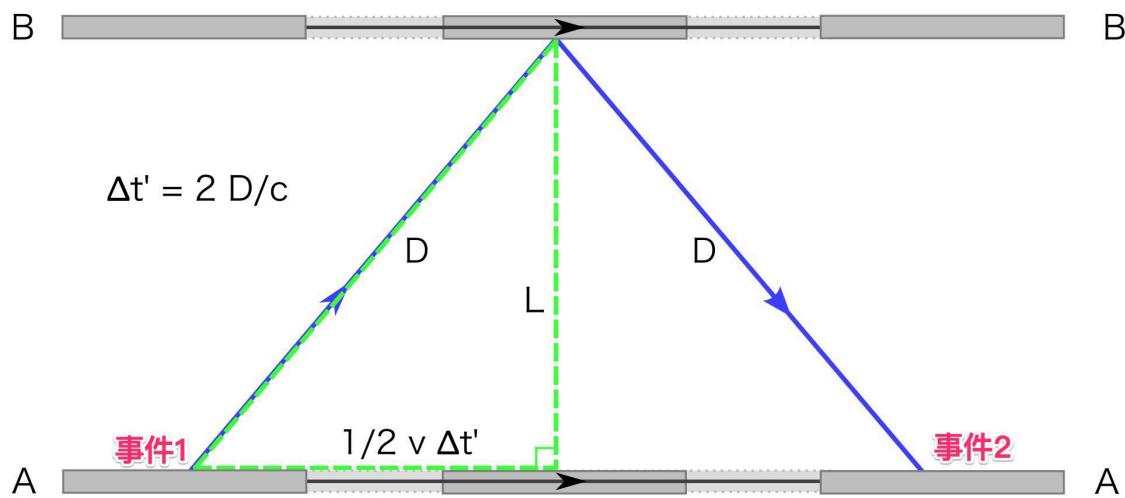
为此，我们首先要定义两个「事件」。在相对论里时间和空间都是相对的，但是事件是绝对的，发生了就是发生了，没发生就是没发生。

我们把光离开盒子的发射端这件事儿称为「事件 1」，把光经过镜子反射之后又回到这个地方，称为「事件 2」。我们假设盒子两个端点之间的距离是 L 。

好。现在请问，事件 1 跟事件 2 这两件事之间，间隔了多长时间呢？

如果你跟盒子是在同一个坐标系内——也就是说，盒子相对于你是静止的——那么答案非常简单，小学生都会算：光走的路线是两倍的 L ，而光速是 c ，所以时间是 $\Delta t = 2 L/c$.

但是，如果你跟盒子不在同一个坐标系内，答案就不是这样了。我们假设你站在地面不动，而盒子相对于你，以速度 v 在水平的方向上有一个运动，如下图——



盒子在动你不动，那么在你看來，从光离开发射装置（事件 1）到光打到镜子上，这个路线就不是垂直的了，因为事件 1 之后盒子要走过一小段距离。现在光要走的路线是一个以 L 为直角边的一个直角三角形的斜边，我们用 D 表示。

所以在你看來，事件 1 和事件 2 的间隔时间应该是 $\Delta t' = 2 D/c$ 。

斜边总是比直角边长， $D > L$ ，所以 $\Delta t' > \Delta t$ 。这也就是说，同样的两个事件之间的间隔，你跟着盒子在一起的时候感觉到的时间，会比你跟盒子之间有个相对速度的时候，要短一些！

那到底短多少呢？这是一道平面几何题，考虑刚才那个直角三角形的另一条直角边长度是 $v \Delta t'/2$ ，你容易推导出来

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

我们可以想象一个人跟着盒子走，另一个人在地面看着盒子走，那么这个公式说，在看着盒子走的人看来，自己的时间过得比较快，而跟着盒子走的那个人的时间比较慢。

用老百姓的话说，这就是「运动物体的时间会变慢！」

我们推出这个怪异的结论，唯一用到的假设就是光速不变。在寻常的情况下，比如你让一个初中生做这道题，他一定会假设时间不变，是光速要变。

所以你一定得非常相信光速在任何坐标系下都不变才行。

4. 寻常不寻常

怎么理解时间变慢这个现象呢？是我们测量用的表有问题吗？不是。

根据相对性原理，物理定律在任何一个匀速直线运动的坐标系都应该一样，表根本就感觉不到自己是在运动还是静止。不但表感觉不到，如果你跟着盒子一起动，你的意识、你身上的每个细胞，组成你的每个原子，也都感觉不到任何问题。

是时间本身，变慢了。

而这个「变慢」也是相对的。运动的你完全感觉不到慢，是在地面不动的我，觉得你慢。

而且这个效应普遍存在，你总是可以假想这个有光的盒子。只要你相对于我有个速度，我看你的时间就比我慢。

为什么我们平时感觉不到这个效应？因为我们平时的相对速度都太低了。只有在 v 相对于 c 不是特别小的情况下，相对论效应才会明显。

那你马上就能想到，如果你能来一段高速的长时间的旅行，再回到我身边，你岂不是就会比我老的慢吗？是的！这个效应已经有实验证明了，咱们下一讲再说。

| 禅定时刻

如果你觉得相对论怪异，那这一切的怪异都是来自光速不变。可是光速为啥不变呢？

复旦大学中文系的严锋教授，曾经有个调侃，说我们这个宇宙其实是一个计算机模拟，因为系统的计算能力有限，所以必须给光速设这么一个上限。

但是从物理学角度，我们知道光速其实是从麦克斯韦方程组解出来的——它是这几个数学方程的一个漂亮的性质。你要觉得光速怪异，首先应该问为什么麦克斯韦方程组是这样的，为什么能解出电磁波来。

这么想的话，答案就是因为我们这个世界本来就是这么奇妙。

你想想，为什么会有「光」这个东西存在？为什么一个带电粒子做点有变化的运动，它就会产生光呢？这难道不怪异吗？

看看我们的周围。这个世界的存在本身，就已经是一件不可思议的事情！那相对论又有什么可奇怪的呢？只不过相对论是个高速效应，而我们熟悉的东西恰好都是低速的而已。

相对论 5~万维钢

相对论 5：穿越到未来

1905 年是大清光绪三十一年，可是直至今天，狭义相对论仍然是个激动人心的理论……而我有时候感觉仍然生活在清朝。

现在有些知识分子还在反对相对论。我曾经看到一篇来自燕山大学的、2007 年发表的正规论文，叫《狭义相对论的本质及对科学哲学和社会的影响》，列举了各种反对相对论的观点，引用了 50 多篇参考文献，说狭义相对论是「科学体系中的一颗毒瘤」。

这些反对者连基本概念都没搞明白，但是他们仍然能找到发论文的地方。所以我有一点感慨。任何一个理论，你要想找都能找出它在历史上的争议，包括各路权威的反对意见。如果你没有区分对错的能力，你只能说这个学问「非常复杂」，越琢磨越糊涂。而如果你想专门去黑或者去捧一个学说，你完全可以得出自己想要的任何结论。

面对这样的事儿，你很可能会陷入虚无主义……难道这个世界就没有对错了吗？

当然不是！科学之所以是科学，就是它有办法判断对错。科学方法首先就是一套判断对错的方法。

相对论是一个非常「对」的理论。当然我并不是说将来绝不会有更好的理论能取代它，但是在当前实验验证范围之内，这是一个特别好特别对的理论。

幸好科学结论不是投票选出来的。我们最终靠的是实验验证。科学家早就对相对论做了大量的验证，咱们今天先说几个。

1. 真的能「长寿」

我们上一讲说到，相对论效应会让一个运动物体的时间变慢。这个效应叫「时间膨胀」，它可以用实验验证。

我们设想有一个距离地球 80 光年远的星球。光走到那里都需要 80 年的时间，而如果我们有一个速度达到 $0.8c$ 的飞船，它飞到那里就需要 100 年。但是，这只是在地球这个坐标系的计算。

对飞船上的宇航员来说，他们的时间会比我们慢。相对论预言，在飞船坐标系

中，完成这趟旅行只需要 60 年。

我们可以选拔一批 20 岁的宇航员去做这趟任务。如果相对论是错的，飞船没有时间膨胀效应，那么飞船就得飞 100 年才能到达目的地，那时候这些宇航员就应该差不多都死了。

而如果你作为其中一名宇航员，到了目的地发现自己居然还活着，自我感觉也就 80 岁，你不就证明相对论是对的了吗？

当然，拿宇航员的一生去做这个实验不太妥当……关键我们现在也没有速度能达到 $0.8c$ 的飞船。但是，这个实验其实是可以做的，而且好几十年前就已经做过了，而且结果完美符合相对论。

科学家做这个实验用的不是宇航员，而是一种叫做「 μ 子」的基本粒子。 μ 子的可以视为是电子的一个变种，关于它你只需要知道一点：它非常、非常短命。

一个 μ 子很容易、无缘无故地、就变成一个电子和两个中微子——物理学家管这个过程叫「衰变」。基本粒子的衰变是个很奇妙的事情。粒子不会变「老」，衰变总是突然发生的，而且是严格按照一定比例的随机事件。 μ 子在静止坐标系下的半衰期只有 2.2 微秒——1 微秒是一百万分之一秒，而这句话的意思是说，给你一堆 μ 子，它们每隔 2.2 微秒，就会死掉一半。

但是我们说了粒子不会变老，所以剩下的这一半 μ 子的半衰期，还是 2.2 微秒——也就是说再过 2.2 微秒，它们还会再死一半。就按照这个固定的速率衰变。

地球天空中的高速宇宙射线中就有 μ 子，它们一边冲向地面，一边衰变——你可以想象，能成功活着到达地面的 μ 子，应该是很少的。

1941 年，物理学家拿 μ 子验证了相对论 [1]。他们首先在美国华盛顿山的山顶上用仪器测量了 μ 子流的密度，他们专门统计那些速度是 $0.994c$ 的 μ 子，看看在一定的面积内，一小时能收集到多少个这个速度的 μ 子。

华盛顿山的高度大约是 2 公里。这些 μ 子从山顶到达山底大约需要走 6.7 微秒。如果这些高速 μ 子的半衰期跟静止 μ 子一样，那么这 6.7 微秒可是好几个半衰期，山底收集到的 μ 子数应该是山顶的 8.5 分之一。

可是，如果相对论是对的，那么这些速度是 $0.994c$ 的 μ 子的时间就应该变慢，它们的半衰期就应该变长，那么你在山底就应该收集到更多的 μ 子。这就相当于飞

船上的一群宇航员，走了很远的距离本来应该几乎全死了，结果却没有死多少。

实验结果，山底收集到的 μ 子数是山顶的 1.3 分之一。这些 μ 子真的通过高速运动保持了青春——这正是相对论预言的结果，数值丝毫不差。

1979 年物理学家又做了一次实验，他们用欧洲核子中心的粒子加速器把 μ 子加速到了 $0.9994c$ ，结果这些 μ 子的平均寿命就被延长了 29.3 倍！

相对论不但正确，而且非常精确。

2. 双生子佯谬

你可能有点羡慕那些 μ 子。这难道不就是一个让人活得年轻的方法吗？的确是，而且我们后面讲广义相对论的时候还会介绍另一个让时间变慢的机制。科幻小说经常使用这种素材，比如电影《星际穿越》里，宇航员去黑洞附近执行任务，回来的时候还挺年轻，可是自己的女儿却已经很老了。



正所谓「山中方七日，世上已千年」。我想提醒你的是这里说的时间变慢，只是不同坐标系对比的结果。对于参加星际旅行的你来说，你实实在在活过的时间，还是正常的寿命。相对性原理要求你根本感觉不到自己多出来什么时间——如果你在地面一辈子能读一万本书，在飞船上这一辈子也只能读一万本书。你在山中过的这七日，也是吃 21 顿饭。

但是你的确比地面上的人老得慢。说到这里有个著名的问题，叫「双生子佯谬」。

比如说你有一个双胞胎妹妹。在你们 20 岁这一年，你乘坐高速宇宙飞船前往远方执行任务，你的妹妹留在地球上。在你妹妹看来，你这一走就是 50 年，你回来的

时候她已经 70 岁了。可是因为相对论效应，你在飞船坐标系下体会到的这段旅程只有 30 年，你回来时候才 50 岁。

走的时候两人一样大，回来的时候你妹妹比你老了 20 年。

这个事实是没问题，但是人们会有一个疑问。

相对于你妹妹，你在飞船上是高速运动，所以会有时间变慢的效应，所以你比你妹妹年轻。可是反过来说，*相对于你*，你妹妹在地球上难道不也是在高速运动吗？那为什么不是她比你年轻呢？

这个问题的答案是你和你妹妹所在的坐标系并不是等价的。你妹妹一直待在地球上，可以近似为一个匀速直线运动的坐标系。而你，离开地球必须首先加速到接近光速，到达目的地之后要减速、调头、再加速，然后回到地球还要再减速，你经历的并不是匀速直线运动。

考虑到这个，精确计算你在每个阶段相对于你妹妹是什么样的年龄就比较麻烦了 [2]，我们这里不讲。不过我们本周五会有一期「番外篇」，专门做一点技术性的讨论。

但是这个效应是真实的，你真的比你妹妹年轻了 20 年。双生子效应已经有实验证实。

你不需要星际旅行。有一种精度非常非常高的原子钟。你把两个原子钟先对好时间，然后一个放在地面不动，带上另一个坐民航的国际航班飞上一圈。你飞回来再把这两个原子钟放在一起，就发现它们的时间有一个极其微小的差异——但是这个差异是实实在在的。参加了飞行的那个原子钟，现在比留在地面的那个要年轻一点。

那如此说来，那些经常在天上飞的飞行员和空姐，他们都比一般同龄人要年轻一点！当然他们速度不够高，一辈子也差不了一秒。

而如果你能把速度提高到无比地接近光速，那你的一天是地面上的人一年、甚至一千年，在理论上都是可能的。你就等于是穿越到了未来。

3. 时空是相对的

跟时间膨胀相对应的一个效应是「长度收缩」。

我们还是说宇航员。同样是一段距离，我们在地面看他应该飞 25 年才能到，在他自己看来，飞 15 年就到了。而且请注意，不管在我们看来还是在他看来，飞船相对于这段距离的飞行速度可是一样的。

那么这就意味着，宇航员看到的这个距离，比我们看到的要短。

所以，长度是个相对的概念。一个物体的长度在相对于它静止的坐标系中是最大的，如果你跟它有一个相对的运动，你会觉得它比静止的时候短一些。这就是长度收缩。

我还记得小时候看过一个日本动画片，用极其夸张的手法描写了这个现象。几个孩子骑自行车，地面的人看他们感觉都变瘦了。

其实严格地说，有人计算得出，三维物体的长度收缩效应是你*观察*到的，而不是你*看*到的。考虑到物体各个部分的光到达你眼睛的距离不一样，你的眼睛实际看到的感觉只是这个物体旋转了一个角度而已。你在视觉上不会觉得它变短了，但是考虑到光速，你做一番计算的话，会得出它变短的结论……这个咱们也不必细说。

时间膨胀和长度收缩这两个效应告诉我们什么呢？空间的长短也好，时间的快慢也好，都跟坐标系有关。不同坐标系中的观测者看到的时间和空间是不一样的。时空并不是一个客观的、不变的、一视同仁的大舞台，每个坐标系有自己的时空数字。不同的坐标系要想交流，得先做「坐标变换」，把对方的时空数字转换成自己的。

但是，在每个匀速直线运动的坐标系*内部*，你所用的物理方程，都是一模一样的。

如果永远不联系，你在飞船的生活跟我在地面的生活就没有任何区别。可是一旦要联系，咱俩的数字就非常不一样。而所有这些不一样，又恰恰是因为光速在所有坐标系下都一样。

相对论是如此地让人不好接受，却又是如此的简单。

相对性原理是一个信念，但物理学家从来都没有把相对论当做「信仰」——科学的精神是实验结果说了算。物理学家始终对相对论保持开放的态度。2011 年的时候，物理学家曾经一度以为中微子的速度能超过光速，但是后来发现那是一个乌龙，是实验设备有问题。

现在我们只能说爱因斯坦完全正确。不要轻易挑战我佛爱因斯坦。

【参考文献】

[1] John S. Reid, Why we believe in Special Relativity: Experimental Support for Einstein's Theory, Report of Public Meeting held in Aberdeen University on March 21 2005.

[2] David Morin 的 Special Relativity: For the Enthusiastic Beginner 一书中列举了双生子佯谬的五种计算方法。

相对论 6~万维钢

相对论 6~「现在」，是个幻觉

「理论物理」是个非常特殊的学问。一般人认识世界都是在实践中摸索一些规律，像现在流行的大数据方法一样，知识来自于经验。但是理论物理学家另有一套方法。

相对论的效应，像时间膨胀和长度收缩这些，都不是来自对生活的观察。我们生活在一个低速运行的世界，我们身边从来都没有人的时间因为运动而变慢，也没有什么东西的尺度因为运动而变小。如果物理学家不说，人们做梦都想不到会有这样的事儿。

物理学家之所以能发现这两个效应，纯粹是因为他们从相对性原理和光速不变这两条基本假设出发，用数学推导的结果。只要你坚信这两条假设，那么不管推导出什么离奇的东西，你就都得接受。你放任一个怪异的东西进门，就得准备好迎接整个新世界。这简直就像是你嫁给一个人，就得接受他身上所有的优点和缺点，包括他的整个家族……你等于是打开了一个魔盒。

然后人们想方设法创造极端的条件去验证那些离奇的结论，发现居然全都是对的。所谓「运筹帷幄之中，决胜千里之外」，也无非就是这样吧？

今天咱们继续说一个从相对论推导出来的令人感慨的事实。

1. 同时不同时

相对论的一个重要结论是，在一个坐标系下看是同时发生的两件事，在另外一个坐标系看就可能不是同时的了。为了理解这一点，我再强调一下「事件」这个概念。

时间和空间都是相对的，但是「事件」是绝对的。比如说咱俩见面握手，这件事不管在什么坐标系下观察，它发生就是发生了，没发生就是没发生，没有任何疑义。但是，事件发生的先后次序，却是不一定。

我来说两个思想实验。咱们来一起体会一下其中思辨的乐趣。

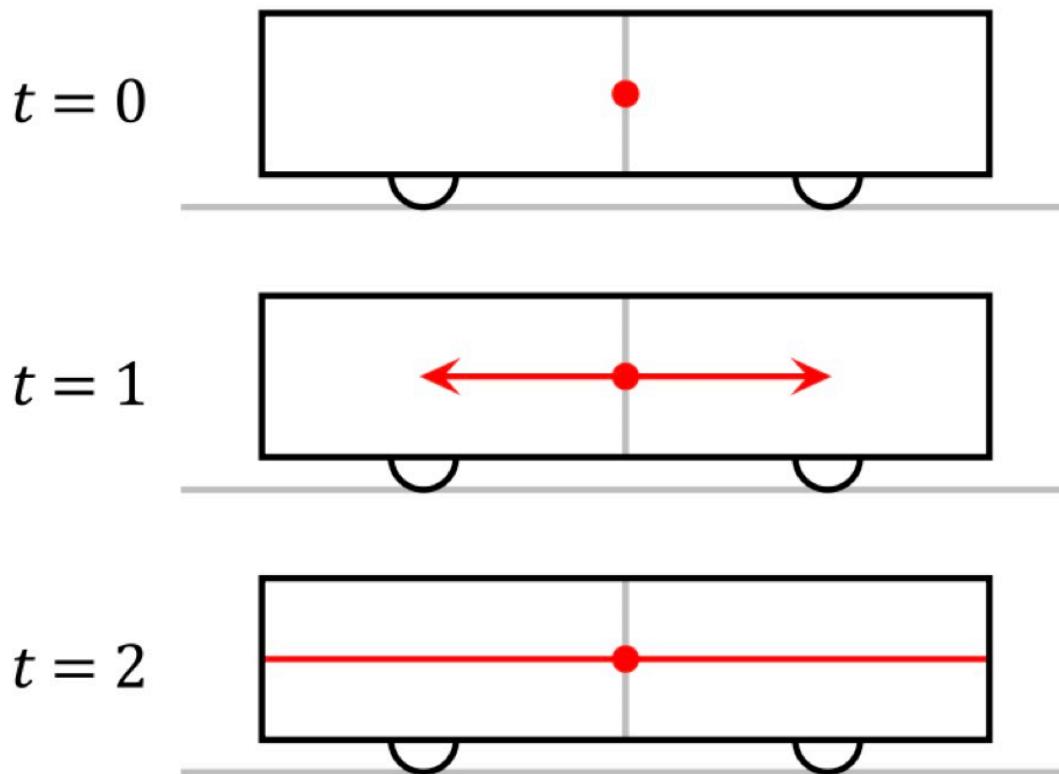
第一个实验是物理课上常用的例子，它跟爱因斯坦本人设计的一个实验有点像，但是能说的更清楚。我们想象有一辆火车正在铁轨上从左到右高速运动。火车上的中间点站着一个观测者，叫老李。你站在火车外的地面上。也就是说，你是处

在相对于地面静止的坐标系，而老李则是处在火车坐标系中，他在相对于地面运动。

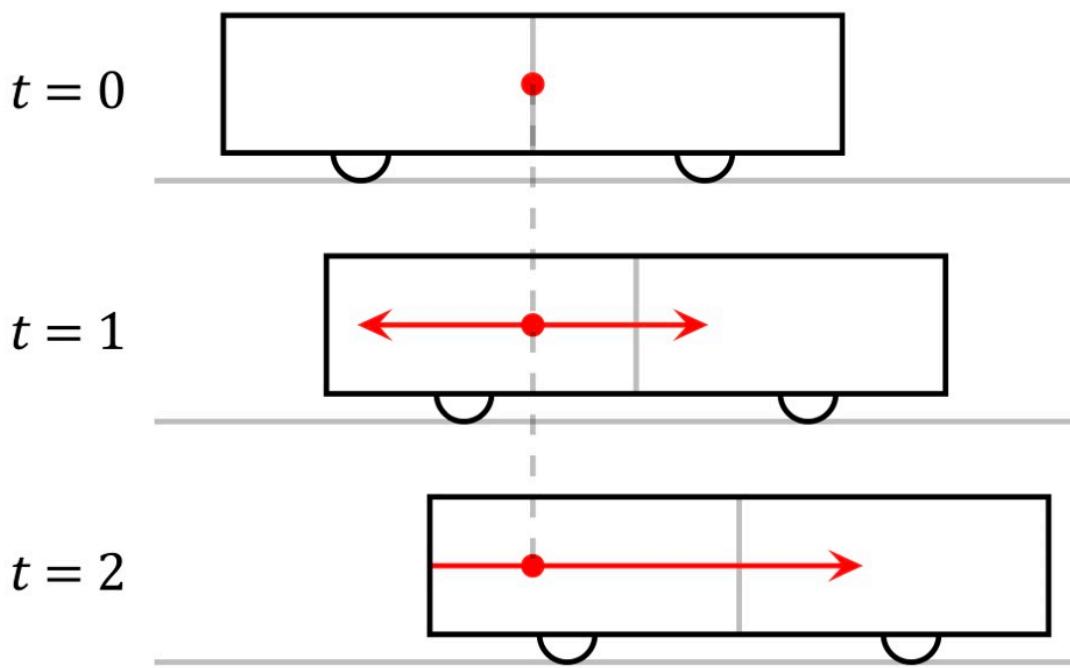
好，我们假设老李在火车中间点这个位置，点亮了一盏灯。你站在地面上，也注意到了这盏灯。

那么请问，这盏灯的灯光到达火车车头，和灯光到达火车车尾，这两个事件，是同时发生的吗？

咱们先看老李。对老李来说，灯光距离车头和车尾的距离相等，而光速是固定的，所以这两件事当然是同时发生的。下面这张图表现了老李看到的光的路线，在每一个时刻，光距离车头和车位的长度都是相等的。



可是对于站在地面上的你来说，可就不是这样了。光在往前和往后走的这段时间内，火车在移动。你看到的前后两束光的路线是下面这样的——



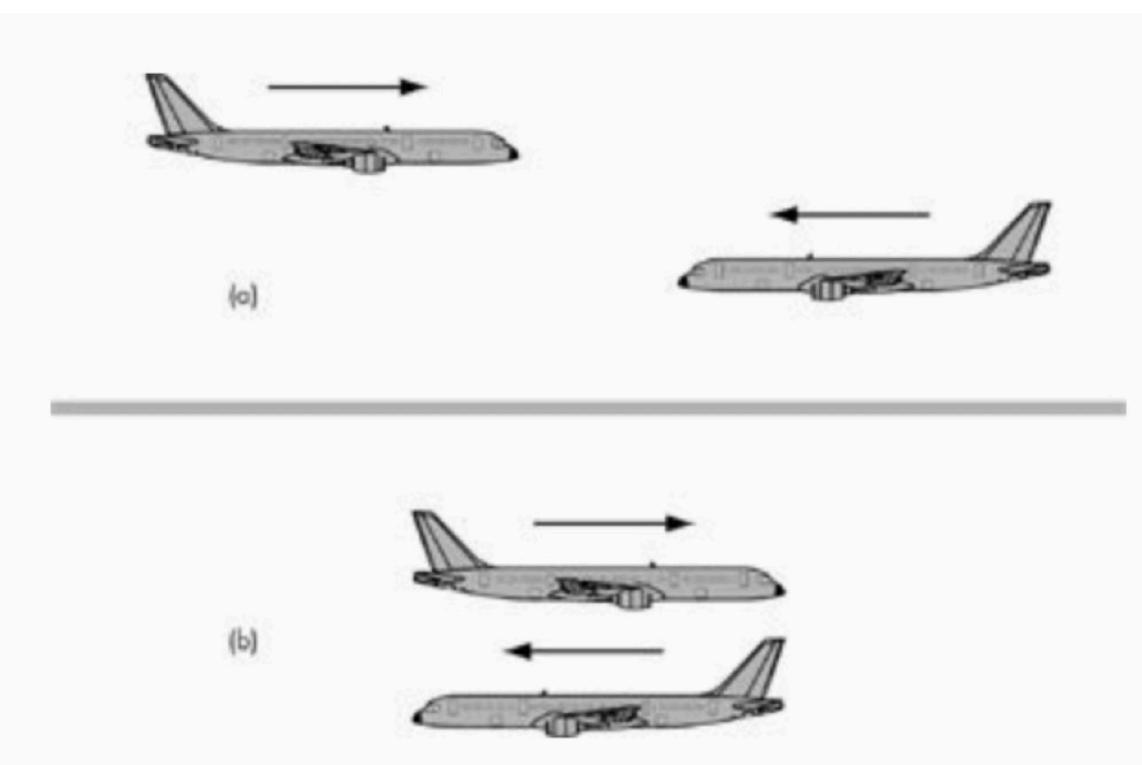
注意，*在你看来*，光速是相对于*你*，而不是相对于火车不变。光源只要闪一下就行，你一直记得光源的位置。在你看来，在光往左边走的这段时间内，车尾也在往右边走。那么也就是说，当左边的光接触到车尾的时候，右边的光还没有接触到车头。

所以在你看来，是车尾先接收到这束光，车头后接收到光——这两件事不是同时发生的。

同时不同时，取决于你是在哪个坐标系下看。

米德尔伯里学院的物理学教授理查德·沃夫森（Richard Wolfson），讲过一个更直观的思想实验 [1]。

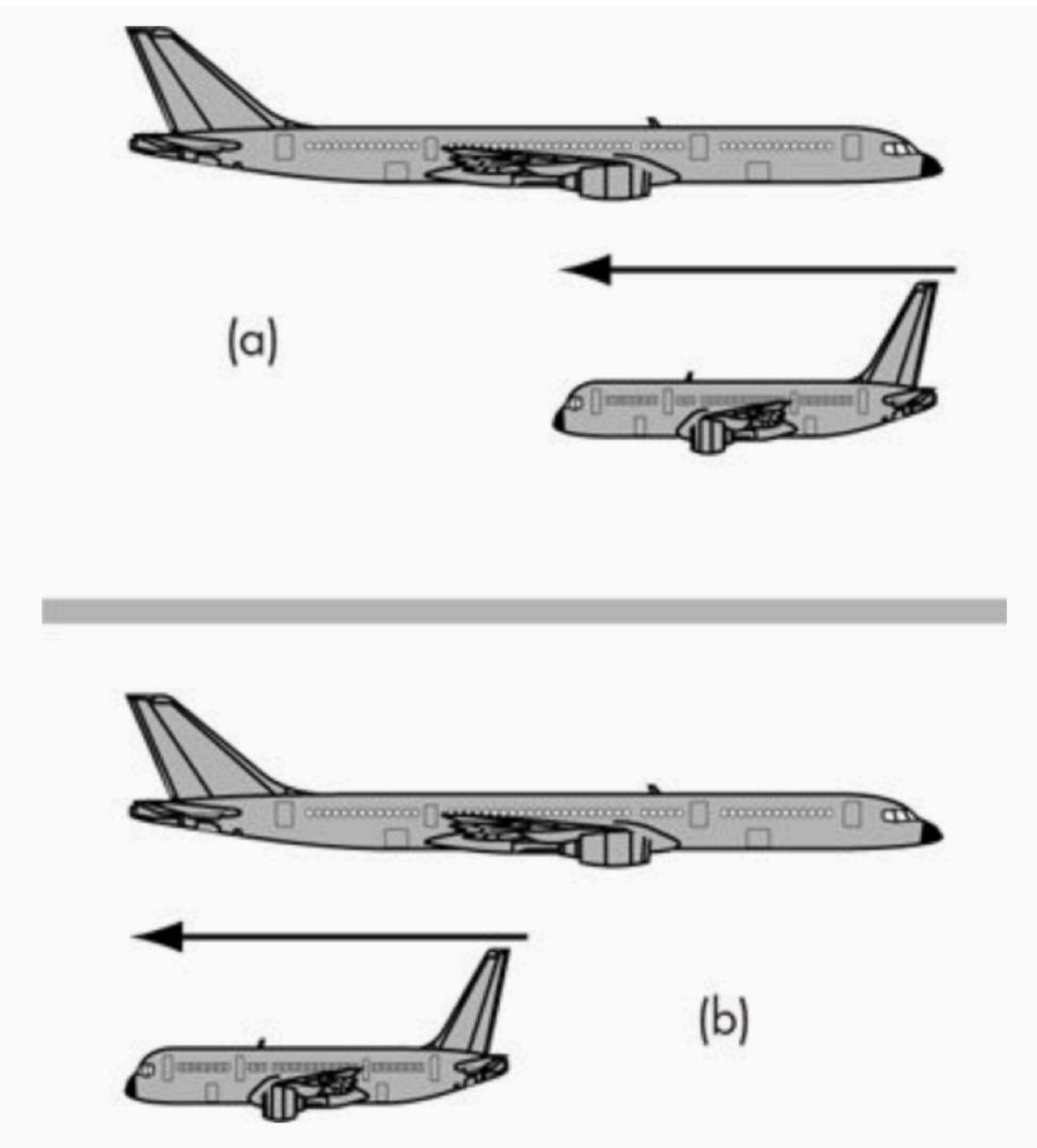
我们考虑有两架同样大小的飞机，以相对于地面同样大小的速度相向而行，一架在上方开，一架在下方开，它们的飞行路线是平行的。



我们规定「事件 1」，是上面那架飞机的机头和下面飞机的机尾相遇；「事件 2」是下面那架飞机的机头和上面那架飞机的机尾相遇。那么请问，事件 1 先发生，还是事件 2 先发生？这就完全取决于你站在什么坐标系上看。

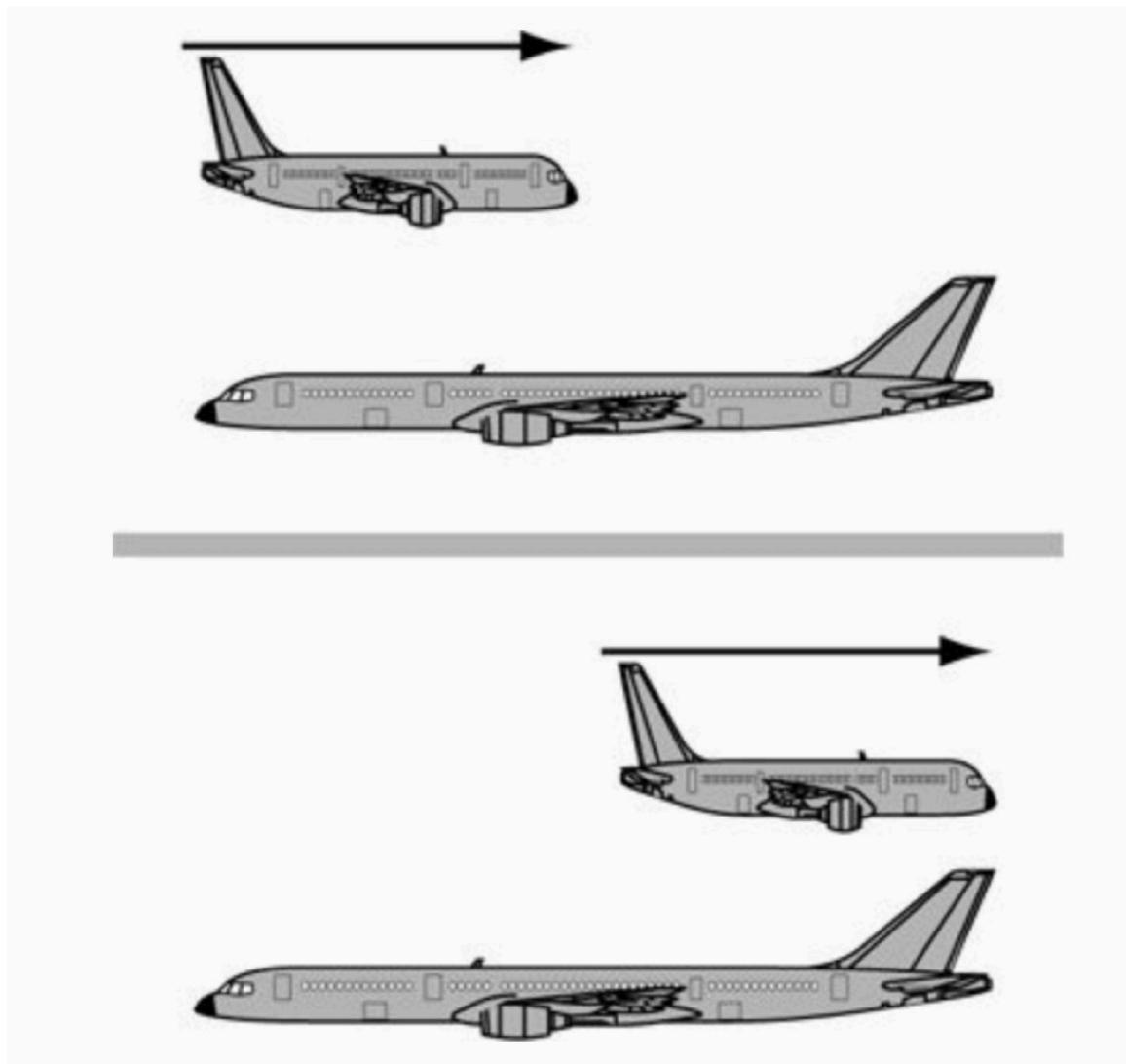
如果你是站在地面上看，既然两架飞机的大小相同，显然事件 1 和事件 2 是同时发生的。

而如果你站在上面那架飞机上看，因为下面那个飞机相对于你有一个运动，你就会觉得下面那架飞机比你所在的飞机短——因为运动的物体会变短。这也就意味着当你的机头遇到它的机尾的时候，它的机头还没有遇到你的机尾！如下图所示



所以你会观察到事件 1 先发生，事件 2 后发生。

同样道理，如果你是站在下面那架飞机上看，你就会发现是事件 2 先发生，事件 1 后发生。



所谓「同时」，是一个相对的概念。你不能脱离坐标系谈两件事是否同时发生。
你甚至不能脱离坐标系谈这两件事是哪个先发生，哪个后发生！

那这就有个大问题了。是不是任何两个事件的先后顺序，都是相对的呢？

2. 光锥之内才是命运

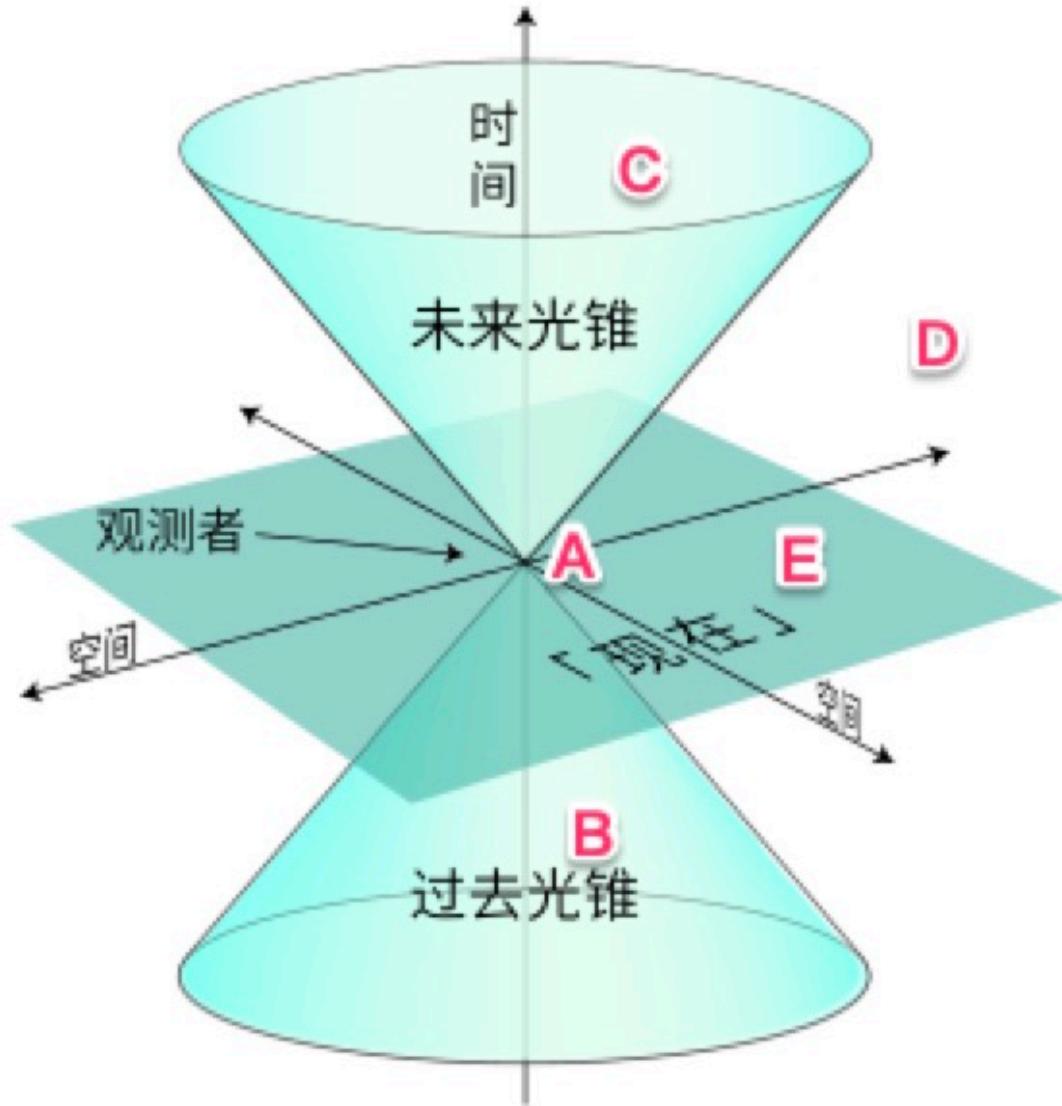
科幻小说里经常有穿越到过去改变历史的剧情。那你肯定想过这么一个问题——

比如我穿越到自己的小时候，然后杀死那时候的我，那将会发生什么呢？

我要说的就是别担心，狭义相对论禁止这件事发生。虽然前面我们说到有些事件的先后顺序是相对的，但是相对论并没有抛弃「过去」和「未来」这两个词。有些事儿的先后顺序在哪个坐标系下看都是一样的。相对论不会混淆因果关系。

那到底哪些事件的先后是相对的，哪些事件的先后是绝对的呢？我们需要借助一个叫做「光锥」的概念。

对于任意一个坐标系中的一个事件 A，我们首先用横坐标代表空间，纵坐标代表时间，画出它在这个坐标系中的时空位置，如下图——



注意我们这里说的是事件，可不是说人。在历史中连续变化的你不是一个事件——此时此地的你，才是一个事件。图中中间那一点 A，就是我们当前的这个事件 A，图中用一个平面代表了空间。从 A 点向上，就是这个事件未来的时间，A 点向下，就是过去。在这个坐标系下，A 的过去和未来一目了然，它的「现在」，则是位于时间原点的一个平面。

那么图中我标记的这几个点，C 和 D 就都在 A 的未来，E 在 A 的现在，而 B 在 A 的过去。

但是，这只是我们在这个特定的坐标系中的看法。也许换一个坐标系，这几个事件跟 A 的先后关系就会不一样。那么哪些先后关系是不会变的，哪些先后关系是可能变的呢？

为此我们就需要「光锥」了。所谓光锥，就是在每一个时间点上，看看光最远能走多远，把这个范围画出来，形成上下两个圆锥形。这两个光锥，代表了事件 A 的影响力边界。

为什么是这样？因为光速是信息传递最快的速度。比如说，我们知道光从太阳走到地球需要 8 分钟。那么请问，此时此刻的太阳和你之间，能互相影响吗？答案是不能。哪怕太阳此刻已经消失了，你也得在 8 分钟之后才感觉到。

这个原理就是光速不能到达的时空的事件，跟此刻的你没关系。但是，如果光速可以到达，那么两个事件的先后关系就是明确的。

上方光锥里的事件 C，就完全可以被 A 影响。C 在 A 的光锥范围之内，A 一定可以给 C 发一个信号。这也就意味着，事件 C 只能发生在事件 A 之后。

比如说，我写下这段文字这件事儿，算是事件 A。你听这段文字的时候，你身边发生的事儿，算是事件 C。这个事件 C 一定是在事件 A 之后，因为我可以通过这段文字给你一个信息，让你去干扰事件 C。

同样道理，下方光锥里的事件，都是有可能影响到 A 的事件，所以一定发生在 A 的过去。

可是图中的事件 D 和 E，却是在 A 的光锥之外。它们和 A 之间无法通过光速建立联系！在这个坐标系中 D 和 E 发生在 A 的未来和现在，而在另一个移动的坐标系中，D 和 E 却有可能发生在 A 的过去。

一个事件的光锥，界定了它的边界。光锥以内的事件跟它^{*可以*}有关，光锥以外的事件跟它^{*必定*}无关。

3. 活在当下

考虑到光锥，我们就可以得出一个有意思结论——「过去」和「未来」都有实实在在的范围，但是「现在」，却是一个相对的概念。

这个坐标系中的那个平面是这个坐标系中事件 A 的现在——E 和 A 同时发生，是「现在」的事儿。但是 E 是在 A 的光锥之外。这也就是说，在另一个坐标系中，E 和 A 就不是同时发生的了，可能发生在 A 的过去或者未来。

现在，其实是一个幻觉。你影响不了现在，也不被现在影响。

这个道理其实很简单。比如咱俩面对面说话，你能看到我的形象，听到我的声音，可是考虑到光和声音都有一定的速度，你看到和听到的，其实都是我的过去。我的现在，可以影响你的将来——但是「我的现在」和「你的现在」这两个事件是不能互相影响的。

在绝对的意义上，你只能活在^{*自己的*}当下，并没有人跟你天涯共此时。

费曼讲到这个道理的时候说，很多人号称能预测未来，而殊不知，人其实连「现

在」在发生什么都不知道。

我们曾经以为时空是个客观的大舞台，宇宙中所有东西有一个共同的标准时间——而真相是时空是相对的。现在是什么时间？这段距离有多长？那个东西的速度是多少？这些问题取决于你用的是哪个坐标系。

时空是相对的，好在因果关系还是稳定的，你不用担心被穿越者篡改历史。而这是来自于光速是信息传递的最快速度这个事实。

那你可能会有一个问题：为什么不能超光速呢？咱们下一讲再说。

参考文献

[1] Richard Wolfson, *Simply Einstein: Relativity Demystified*.

相对论 7~万维钢

相对论 7~质量就是能量

普通的物理家能完成常规的数学推导和实验测量。优秀的物理学家哪怕面对离奇的结论，也敢于把原则坚持到底。而爱因斯坦，则是跳出推导、自己建立原则的人。

前面我们说了几个相对论的著名结论，包括时间膨胀、长度收缩、「同时」是相对的。这些结论看似离奇，但是都是数学的操作，都可以从相对性原理和光速不变推导出来。

爱因斯坦的了不起之处不在于这些机械化的推导，而在于他提出了相对性原理和光速不变这两个假设。

这是最高级的科学研究动作。提出假设需要洞见和勇气，往往带有一点个人风格。英雄从来都不是按照剧本走的人，英雄得任性。

今天我们将看到爱因斯坦的再一次任性发挥。

物理学是个专门看破红尘的学问，它的主旋律是解放思想。爱因斯坦在相对论上的第一次出手是告诉我们电动力学和常规的物理定律是一回事。这一次他将告诉我们，质量和能量是一回事。

1. 速度叠加

咱们先解决那个已经困扰了我们很久的问题，在相对论中，不同坐标系下的速度应该怎么算。

比如说，你在一艘速度是每小时 100 公里的船上射出一支箭，这支箭相对于你的速度是每小时 200 公里。常规的计算方法，相对于地面，这支箭的速度应该是每小时 $100 + 200 = 300$ 公里。

这个把速度直接相加的算法在相对论中肯定是不对的。不然的话，想象你在一个速度是 $0.75c$ 的高速飞船上向前发射一支相对于飞船的速度是 $0.5c$ 的火箭，那火箭相对于地面的速度不就成了 $0.75c + 0.5c = 1.25c$ ，你不就超光速了吗？

正确的算法是，你得考虑，我在地面上看火箭走过的距离和时间，和你在飞船上看是不一样的，我们必须考虑时间膨胀和长度收缩的效应。具体来说，如果飞船

相对于地面的速度是 v ，火箭相对于飞船的速度是 u' ，那么，火箭相对于地面的速度 u ，不是简单地等于 $u'+v$ ，而是一个公式——

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$$

使用这个公式，火箭相对于地面的速度是 $0.91c$ ，没有超光速。

这个公式的数学形式很简单，我建议你把玩一下。比如说，在 u' 和 v 都远远小于 c 的情况下， $u = u' + v$ ，就回到了我们寻常认知中的速度相加……我们的日常生活定律恰恰是相对论的一个低速近似。

再比如说，我们回到「在飞船上打手电筒」的问题，那相当于 $u'=c$ ，而公式告诉我们， u 也等于 c — 也就是说你在飞船上看到的光速，跟我在地面看到的完全一样。

根据这个公式，不管你要叠加的两个速度如何地接近光速，结果都无法超过光速。

那你大概可以想象，给一个飞船不断地加速，应该也无法超过光速。

2. 质量变重

咱们考虑这么一个情景。你坐在一艘宇宙飞船上飞行，我在地面上静止不动。飞船相对于我有一个很高的速度 v ，但是相对于你，它的速度始终是 0。

你总可以给飞船来一个加速。它相对于你的速度永远是 0，但是你可以感受到加速的「推背感」。假设你不断地加速，你心想，现在飞船的速度肯定是越来越快，应该快到光速了吧？

但是，在地面的我看来，速度叠加可不是简单的 $u'+v$ 。我看到的是虽然你每次踩油门都能增加一点速度，但是你这个速度的增加值，是越来越少了。

你自己觉得自己仍然在生龙活虎地加速，我看你却是一个正在变油腻的中年人，越加速越吃力。

简单地说，这就等效于在我看来，你的飞船正在变得越来越重。

这就是相对论的另一个效应：高速运动物体的质量会变重。质量变重的形式和时间膨胀一样——

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

其中的 m_0 是这个物体静止时候的质量。

相对论的这几个效应，你可以用类比和联想的方法加深记忆：运动会让你更年轻（时间膨胀）、变瘦（长度收缩），和变结实（质量变重）。

根据这个公式 [1]，我在这里只想说一件事——

当你的速度接近光速的时候，我眼中你的质量就会接近于无穷大。

在你看来，你的飞船随时都在从 0 加速。而在我看来，你每一次加速都越来越不容易——最后想要达到光速，你需要无穷大的力量！

这也就意味着一切有质量的物体都不可能达到光速。现代物理学家可以用加速器让一个电子达到 $0.9999c$ ，但是它永远都不可能达到真正的光速。电子会变得越来越重，你输入再多的能量也不够用。我听说以前欧洲核子中心刚建成的时候，一开加速器就要耗费太多的电，周围镇子里的老百姓说你们冬天能不能少做点实验，因为我们取暖也得用电。

但是，如果一个东西的静止质量是 0，它的质量就永远都是 0，它就谈不上加速和

减速。为什么光子的速度是光速？因为光子的静止质量就是 0。光子不会减速，它的时间也永远不动，它不会变老——它要么以光速运动，要么消失。

好，目前为止这些结论都可以从物理学的基本假设推演出来，一个普通的物理学家也能做到。接下来，我们把舞台再次交给爱因斯坦。

爱因斯坦 1905 年发表论文的速度有点像写专栏。9 月 26 日，《论运动物体的电动力学》正式发表。9 月 27 日，爱因斯坦就提交了下一篇有关狭义相对论的论文，叫《物体的惯性同它所含的能量有关吗？》

这篇论文可不是狭义相对论的简单延伸，它告诉了我们另一个做梦都想不到的事实。

3. $E = mc^2$

我们已经知道运动的物体质量会变重。那请问，多出来的重量，是多在了哪里呢？爱因斯坦把质量变化的公式做了一个小小的变化 [2] ——

$$mc^2 = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2 + \dots$$

我们就能看出来，在速度比较低的情况下，运动质量和静止质量的差异，乘以 c^2 ，正好就是牛顿力学里的「动能」。

换句话说，质量*增加*的部分是能量……

……那质量*本身*，是否也是能量呢？

爱因斯坦就产生了这么一个洞见： mc^2 代表一个物体的*全部能量* —— 哪怕它静止不动，它的质量本身，也有能量。这就是著名的「质能方程」——

这绝对是一个思维跃迁。这是一个充满爱因斯坦风格的断言。在此之前从来没有人想过质量蕴含着能量。你从数学公式能推出这一项来，但是爱因斯坦现在给这一项赋予了意义。这是画龙点睛的一笔。

那这能说明什么呢？咱们来做个思想实验。

有一颗炸弹，老老实实地在房间的中间静止不动。炸弹的质量是大写的 M0，所以

它的总能量——其中包括它蕴含的一切化学能量——就是 $M_0 c^2$ 。

现在这个炸弹爆炸了，它正好炸成质量相等的两个碎片，向两个相反的方向高速飞行。每个碎片的*运动质量*是小写的 m ，能量都是 mc^2 ，那么根据能量守恒，我们必须要求 $M_0 = 2m$ 。

这两个碎片会跟房间里的各种东西发生一系列的碰撞和摩擦，最终它们的动能会变成热量消耗掉。两个碎片最终会静止下来，这时候它们的质量都是小写的 m_0 。

而根据相对论，我们知道 $m > m_0$ ，所以， $M_0 > 2m_0$ 。

这也就是说，炸弹在爆炸之后，会损失一点点质量。那损失了的一点点质量，就是炸弹释放的能量。能量来自质量。

我们关于这个炸弹的推理适用于一切释放能量的现象。比如说蜡烛的燃烧。你在点燃蜡烛之前称一称它的重量，再算一算它燃烧过程中需要用到的氧气的质量。等蜡烛烧完，你再称一称它变成的灰烬的重量，再算一算它产生的燃烧气体的重量，前后比较——

你会发现，总重量减少了一点点。那减少的一点点重量，化作了蜡烛燃烧向周围释放的光和热。

在爱因斯坦发现质能方程之前，从来没有人想过化学反应会损失质量。这是因为光速实在太大，一点点质量就能化作巨大的能量。这是一个几乎在实验上无法测量出来的微小差异。

但是爱因斯坦就这么预见到了。其实不但是炸弹和蜡烛，不管什么东西，只要有能量差异，就有质量差异。比如你把一根橡皮筋拉紧了，称一称它的重量；然后你再把它放开，再称一称它的重量——那么橡皮筋的重量应该减轻了一点点，因为它释放了一点点动能。

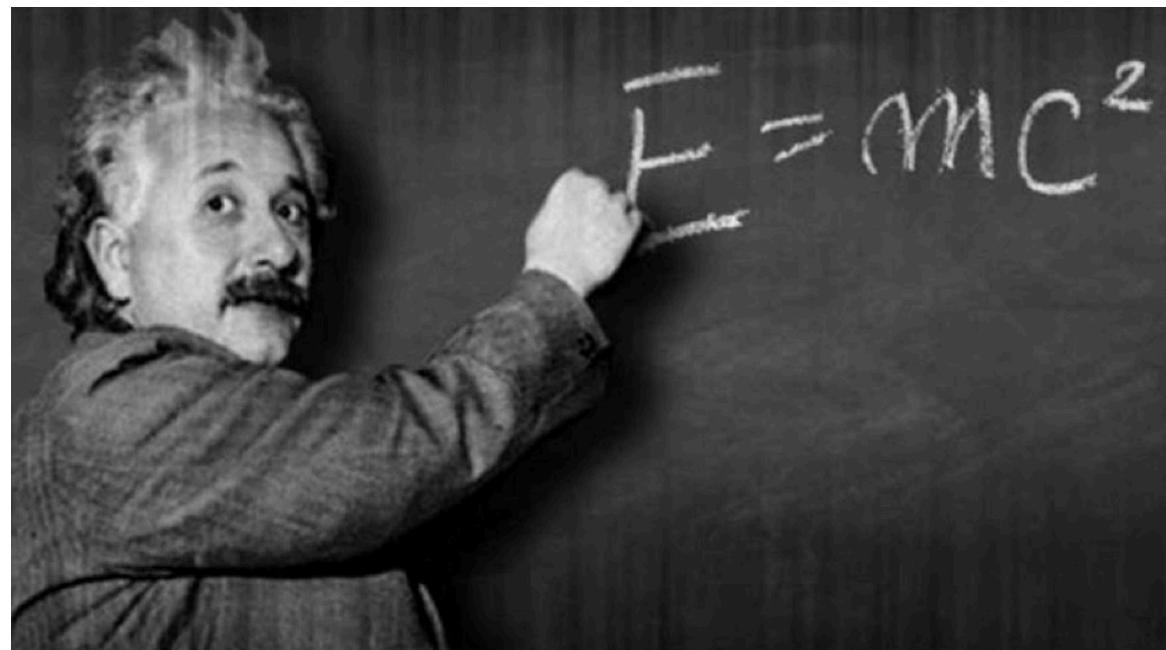
但是这个质量的减少实在太小，连爱因斯坦都觉得这是无法验证的。爱因斯坦曾经想到，也许核反应释放的能量比较大，能验证他这个理论，但是他自己想想还是觉得核反应太难实现，没抱什么希望。

结果谁也没想到，后来核物理发展的非常快，人们做出了原子弹，还能用核能发电，而实验结果完全符合爱因斯坦的质能方程。

$$E = mc^2$$

我们可以说爱因斯坦再一次看破了红尘。宇宙中所有的东西，无非就是质量和能量——而爱因斯坦现在告诉你，这两种东西其实是一回事：质量就是能量。

质能公式还告诉我们，只要人类的技术够高，就永远都不用担心能源短缺的问题。光速 c 实在是太大了！你只要花费一点点质量就能换来巨大的能量。如果受控核聚变能做成，每年用上几克原料就够一个城市一年的电量。



$E = mc^2$ 这个公式已经被永远地跟爱因斯坦联系在了一起，以至于很多人以为是爱因斯坦发明了原子弹——真实情况是爱因斯坦没有参与过原子弹的研究，他只是给罗斯福总统去了一封信呼吁美国搞原子弹，而且那封信还是别人写的，爱因斯坦只不过允许他使用自己的名字而已。

但是我敢说，爱因斯坦的洞见配得上所有这些荣耀。至此狭义相对论我们就算讲得差不多了，一开始仅仅是一个光速不变，现在却是连化学都要颠覆，你体会一下我们是怎么一步步走到这里的。

相对论的奇迹还没结束。接下来我们要讲广义相对论，爱因斯坦将会再一次看破这个世界。

注释：

[1] 当年费曼讲相对论讲到这里的时候说，学习狭义相对论，记住这一个公式就行了，这个公式代表了狭义相对论对牛顿力学的所有修正。我们这里只讲了一个意会式的介绍，严格地说这个公式来自「动量守恒」的要求。

[2] 如果你学过高等数学，这个方法叫泰勒展开。实际的思想很简单，就是考虑速度比较低的情况下，质量公式是什么样子。

相对论 8~万维钢

不可思议的巧合

不知道你亲眼见过鲸鱼没有。我在海洋世界看过鲸鱼的表演。有的动物可爱，有的动物凶猛，而鲸鱼给我的感觉跟别的动物完全不一样。鲸鱼的身体那么大，曲线那么美，姿态又是那么优雅。鲸鱼游来游去，有时候还活泼地向观众拍打水花。可是我坐在那里，感觉它们好像是比人类更高级的存在，有如神明一般。

广义相对论给我的感觉就是这样。大，而且优雅。

广义相对论是一个美丽的理论。

牛顿的引力公式过于直白，没有内涵。我们应该庆幸自己生活在一个广义相对论主导的宇宙里。广义相对论的数学特别难，思想却是简单的，只是非常深刻。想想它的来龙去脉，它意味着什么，它能推演出什么东西，其乐无穷。

咱们还是先来一点铺垫。讲狭义相对论的时候我们已经看到，爱因斯坦喜欢给你设定一两条最简单的原理，然后不管推导出来什么怪异的结论你都得接受。广义相对论也是这样。

1. 广义·相对性原理

狭义相对论的缘起是一个危机。物理学家搞不清楚光速到底是相对于谁的。一个问题等了 18 年，等爱因斯坦长大了，才给解决。但是广义相对论可不是这么来的。广义相对论，是爱因斯坦自己提出来要干的事儿。

1905 年，刚刚发表了狭义相对论，爱因斯坦就已经开始思考广义相对论，用了十年才最终完成。那他想要的是什么呢？

我们知道狭义相对论的出发点是「相对性原理」：一切匀速直线运动或者静止的坐标系下，物理定律都是一样的。

现在爱因斯坦想的就是，为什么非得限制成「匀速直线运动」呢？为什么*加速*运动就不行呢？物理学中的速度不但有大小而且有方向，所谓「加速运动」，就包括了像圆周运动、拐弯、变速等等各种运动。有了一个加速度，就可以描写所有「瞬时的运动」了。

所以爱因斯坦说，我能不能把相对性原理再推广一下，改成——在所有的坐标系

下，物理定律都是一样的。

这就叫「广义的相对性原理」。这个思路很有哲学味道，但是它蕴含着颠覆性的新物理学。

当时并没有人给爱因斯坦提这个需求，那时候别的物理学家都还在消化狭义相对论。

但是，我想你容易理解爱因斯坦这个思路。这就好比说我已经统一了中国，那我下一步是不是应该征服全世界呢？其实，当时世界人民并没有表现出想被你征服的强烈愿望，是爱因斯坦自己非得这么干。

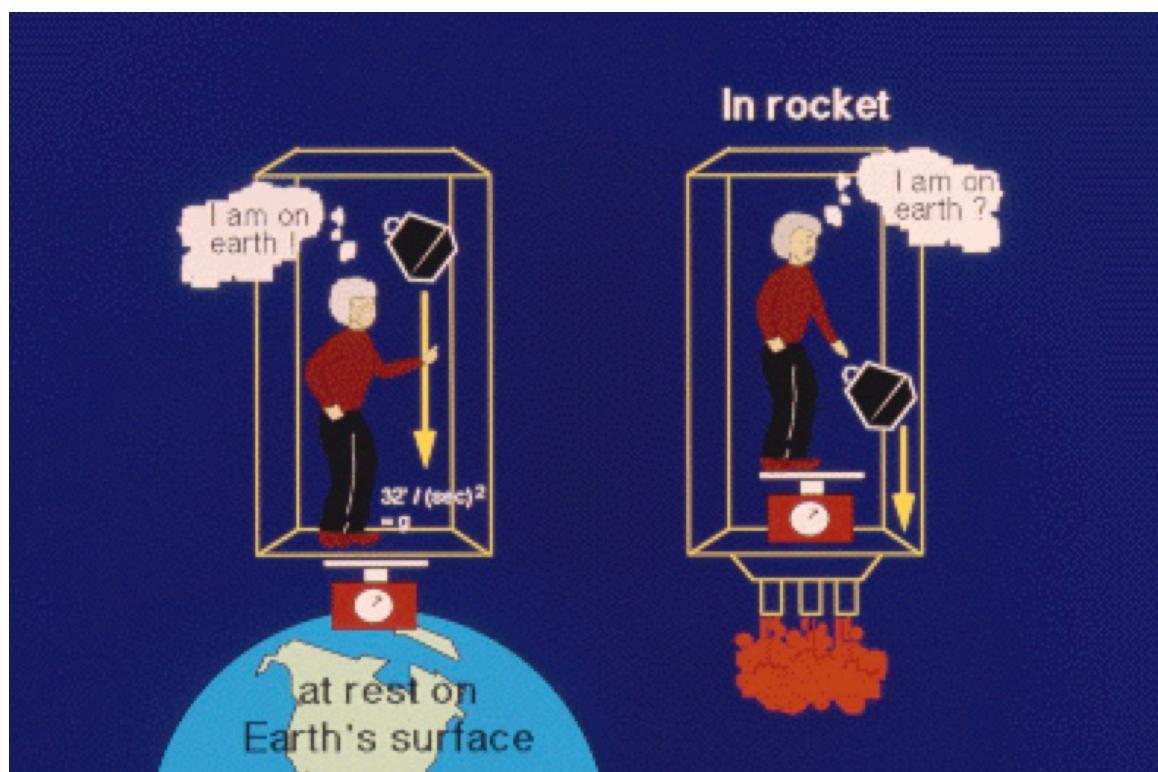
为此，爱因斯坦必须弄清楚「引力」。

2. 加速和有引力

让爱因斯坦取得突破的首先是这么一个思想实验。想象你站在一个像电梯一样的长方形的封闭飞船里。在你脚下有个火箭，给你提供一个推力，让你一直向上加速运动。

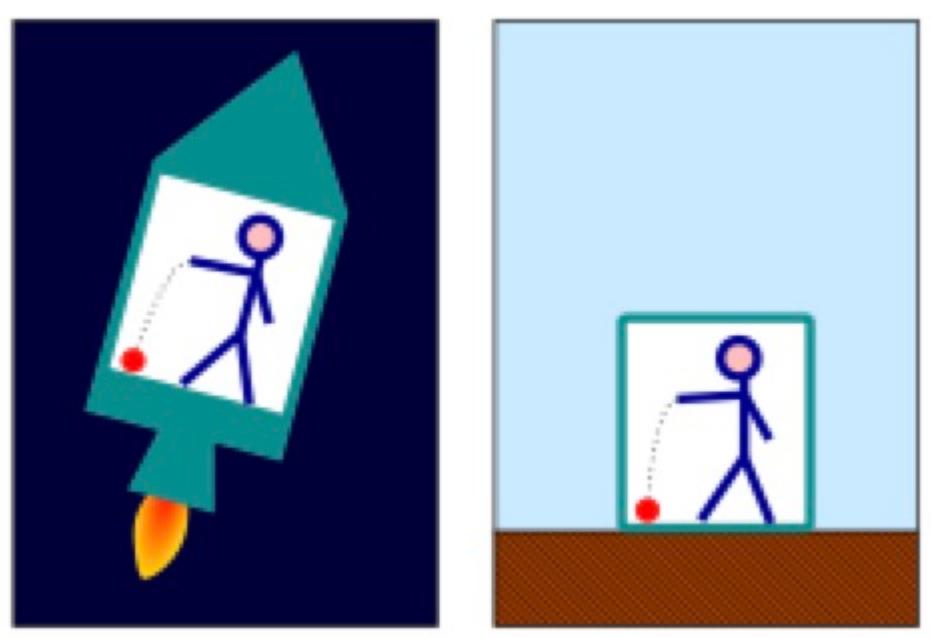
你可以想象这种运动跟匀速直线运动截然不同。在匀速直线运动里你是自由的，但是加速运动里你会感到一个力。我们坐车的时候都有过这种感觉，车一加速，你会有一个推背感。

那么爱因斯坦就问，我在飞船上做加速运动的时候，感受到火箭的推力，这种感觉，和我站在地面感受到地球的引力，有什么区别吗？



地球引力给我们的感觉是实实在在的。你站立的时间长了会觉得累，就算躺在床上，后背也会有一个压力。可是在飞船上也是这样，加速会给你一个推力的感觉。

在地面，如果我让一个小球自然下落，它在引力作用下会越落越快，加速冲向地面。可是我在火箭里也是这样——我放开小球，小球就自由了，但是火箭在往上走，火箭的地板会加速冲向小球：在我看来，这完全等同于小球加速冲向地面。



一个是加速向上的火箭里，一个是站在地面静止。牛顿会认为这完全是两回事，运动状态不一样，受力情况也不一样，前者你只受到火箭的推力，后者你同时受到地球的引力和地面的推力。

但是爱因斯坦说，我在飞船内部做实验，明明观测不到任何区别。

3. 自由落体和没有引力

我们再看一个思想实验。爱因斯坦想的原始版本是，想象你在一个电梯里，电梯突然间失控，以自由落体的形式往下坠落，你想想那是一个什么感觉。

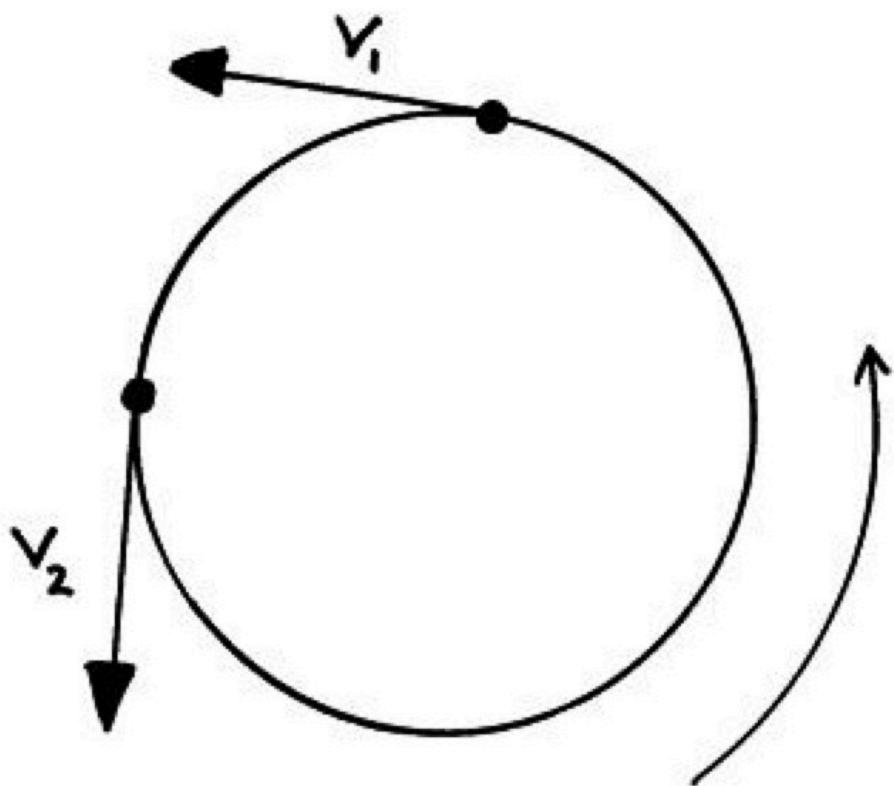
答案是你会感到「失重」。当然电梯这个想象有点不吉利，咱们换一个对现代人来说更直观的场景。太空的空间站，绕着地球在做圆周运动，其实跟坠落的电梯一样，都是自由落体。只不过空间站有个很高的水平速度，它不会真的掉下来。

自由落体运动中的物体处在失重状态。我们看宇航员就是失重的，他们可以在空间站里漂浮，他们不分上和下。他们如果把水滴放在空中，水滴不但不会下落，而且还呈现一个完美的球形。



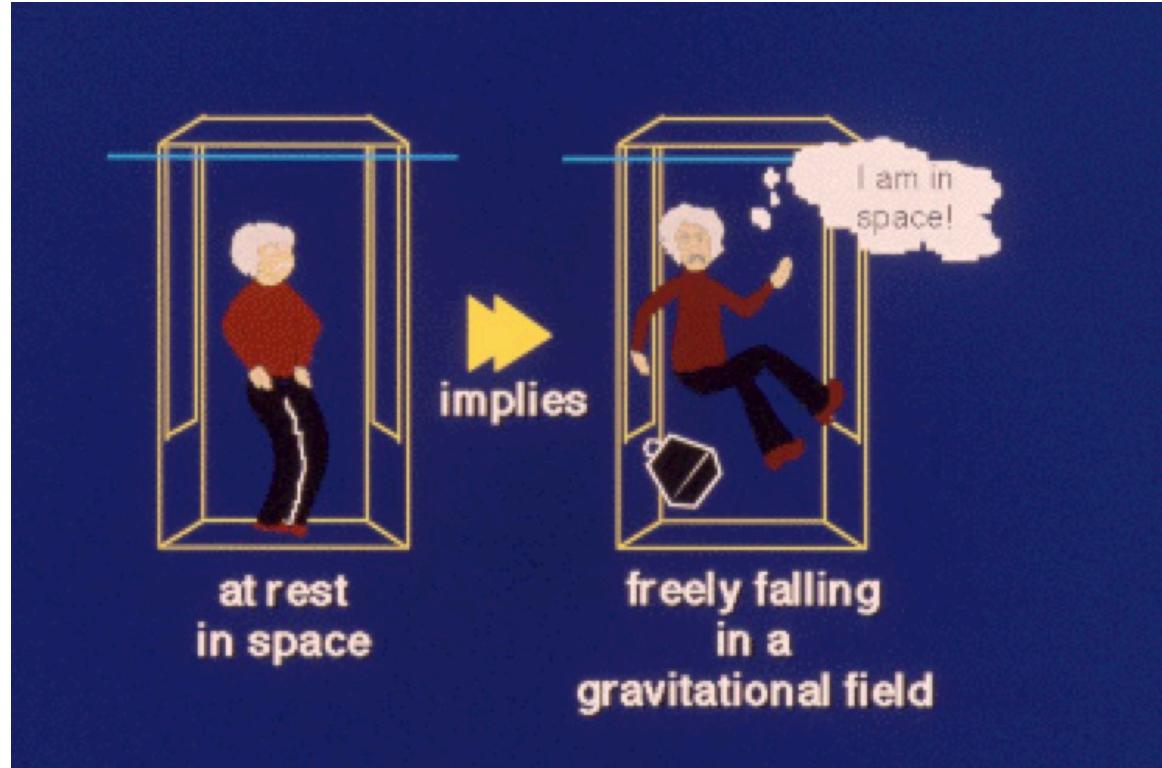
这给了很多观众一个误解，以为是太空没有引力。其实空间站的高度跟地球半径相比不算什么，太空的引力并不比地面低多少。你在太空之所以感觉不到引力，是因为你是在做自由落体运动！

宇航员绕着地球转也好，电梯从高层掉落也好，它们都是自由落体，都会失重，也都是「加速运动」。别忘了，速度不但有大小，而且有方向。圆周运动的速度大小可以不变，但是方向一直在变，它跟匀速直线运动有本质的区别。所以，圆周运动也是一种加速运动。



physicsnet.co.uk

好，那爱因斯坦问，这种运动中的失重感，跟我在一个远离一切星球、做一个完全不受外力影响的匀速直线运动，有什么区别吗？



牛顿会说当然有区别！前者是引力作用下的加速运动，后者是没有外力时的匀速直线运动！

但是爱因斯坦说，我身处那样的环境，不管做什么实验，都无法发现两者的区别。

这就很有意思了。之所以没区别，这里边蕴含着一个你想不到，但是在物理学家看来是极其怪异的事实。

4. 巧合

咱们先想想这个问题：为什么自由落体明明是个加速运动，可是爱因斯坦却说它跟匀速直线运动没区别呢？因为自由落体状态下所有物体的加速度都是一样的。

我们高中学过，地球上任何一个物体，无论是苹果，桌子，还是一个胖子，他们如果从高空掉下来，所有物体的加速度都是一样的，你可能还记得那个数字，加速度都是 9.8m/s^2 。

只有这样，当你在空间站中把一个小球悬浮在空中的时候，它才会一直停留在你身边，它会跟着你一起动。如果小球和你的加速度不一样，你们两个就会迅速分开，你就会觉察到现在不是匀速直线运动，对吧？

好，那为什么自由落体中所有物体的加速度都一样呢？因为地球引力对所有物体一视同仁。

那为啥会一视同仁呢？你以前学高中物理的时候是先默认了一视同仁，现在我换个讲法你就发现其中的问题了。

牛顿力学告诉我们，一个物体受到力，是导致它产生加速度的原因， $\text{力} = \text{质量} \times \text{加速度}$ 。受力带来的加速度大小跟这个物体的质量有关系，对吧？这个质量，我们先称之为「惯性质量」。

牛顿引力公式又告诉我们，每个物体感受到的地球引力的大小，也跟这个物体自身的质量成正比，对吧？这里又有一个质量，这个质量，我们先称之为「引力质量」。

中学老师一上来就告诉你「质量、质量」——可是你想过没有，这两个地方出现的质量，为什么是一样的呢？换句话说，为什么「惯性质量」非得等于「引力质量」呢？

这是一个完全合法的疑问。惯性质量决定了力怎么给物体带来加速度——任何形式的力都可以，电磁力带来加速度也是用这个质量算，这里面跟「引力」并没有天生的关系。引力质量仅仅是引力的一个性质，决定了一个物体受到的引力大小，也就是「重量」。

我们小时候总是默认质量就是重量，越重的东西就越不容易推动，其实它们是两回事。你想想，比如这里有一个胖子，他的「重量」是个向下的东西；而你要推他不容易推动，那是一个水平方向上的故事。加速度可以是任何力在任何方向的结果，引力可是只有一个方向，那这两者为什么一样呢？

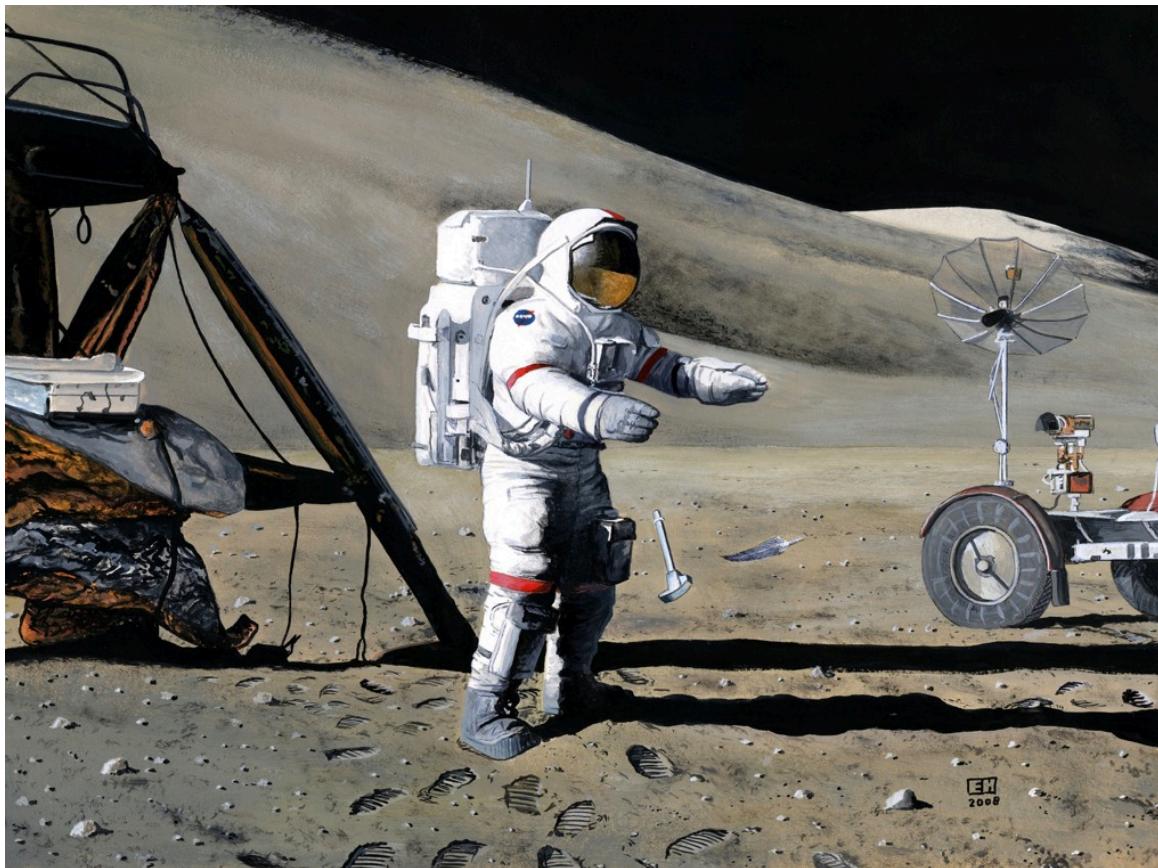
说到这里，有一个相当经典的案例，就是传说中的比萨斜塔实验，伽利略证明了一轻一重两个铁球从高处落下来是同时着地——也就是说，引力给它们的加速度完全一样：引力，很尊重小球的「惯性质量」。



伽利略当年论证为什么两个铁球必须同时着地，用了一个反证法。他说如果是越重的物体落得越快，那我们可以把一个轻的铁球和一个重的铁球粘在一起——一方面，轻的铁球应该拖慢重的铁球，现在的下落速度应该比重的铁球更慢一些；可是另一方面，现在你得到了一个更重的大铁球啊，应该下落更快才对啊？这个矛盾表明，铁球的下落速度应该跟轻重无关。

伽利略这个论证其实站不住脚。伽利略默认了引力给加速度的时候*只看*重量——或者说，引力给重量的时候*只看*它们的加速性能。可是引力凭什么这么干？

惯性质量正好等于引力质量这件事，现代物理学家能给的最好解释，是……纯属巧合。物理学家在真空中精确测量过两个铁球是不是同时落地，在月球上都做过这个实验，结果都是惯性质量精确地等于引力质量。我们不知道为什么这个世界是这样的，但是它就是这样的。



你马上就能想到，这跟「光速不变」好像很像：你再想不通，也得接受。

5. 爱因斯坦的断言

广义相对论的出发点，是爱因斯坦的一个断言——

在任何局部实验中，引力和加速运动无法区分。

这句话叫做「等效原理」，它等于就是说「惯性质量 = 引力质量」。爱因斯坦说别问为什么了，这个世界就是这样的。

在一个封闭的房间里，你说你正在地面待着享受引力，我可以说你其实是在一个加速运动的火箭里。你说你正在引力的作用下享受自由落体，我可以说你其实是一个不受任何引力影响的匀速直线运动中。

爱因斯坦说，只要这个房间的尺度不是超级大，你说的和我说的就没区别。

那我们再想想，引力到底是个什么东西。站在地面上，你能切切实实感到引力的存在。可是只要你随便做个自由落体运动，引力对你就不存在。

一个东西如果是真实的存在，它怎么可能在静止坐标系下看就有，在一个加速坐标系下看就没有了呢？爱因斯坦的新要求可是物理定律不管在什么坐标系下都一样。

我们的结论就只能是，引力这个东西，其实是个幻觉。

……或者说的严格一点。在局部，引力根本就不存在。在大尺度范围，引力根本就不是力……正如鲸鱼不是鱼。

那引力到底是什么呢？只有爱因斯坦能提出这样的问题，也只有爱因斯坦能回答这个问题。咱们下一讲再说。

相对论 9~万维钢

大尺度的美

广义相对论的数学非常难。连爱因斯坦都觉得自己的数学不够用，后来是在数学家的帮助下使用微分几何的知识，才得到最终的引力场方程。我们不会讲任何数学细节，但是既然说到了广义相对论，我想你应该看一眼引力场方程的样子——

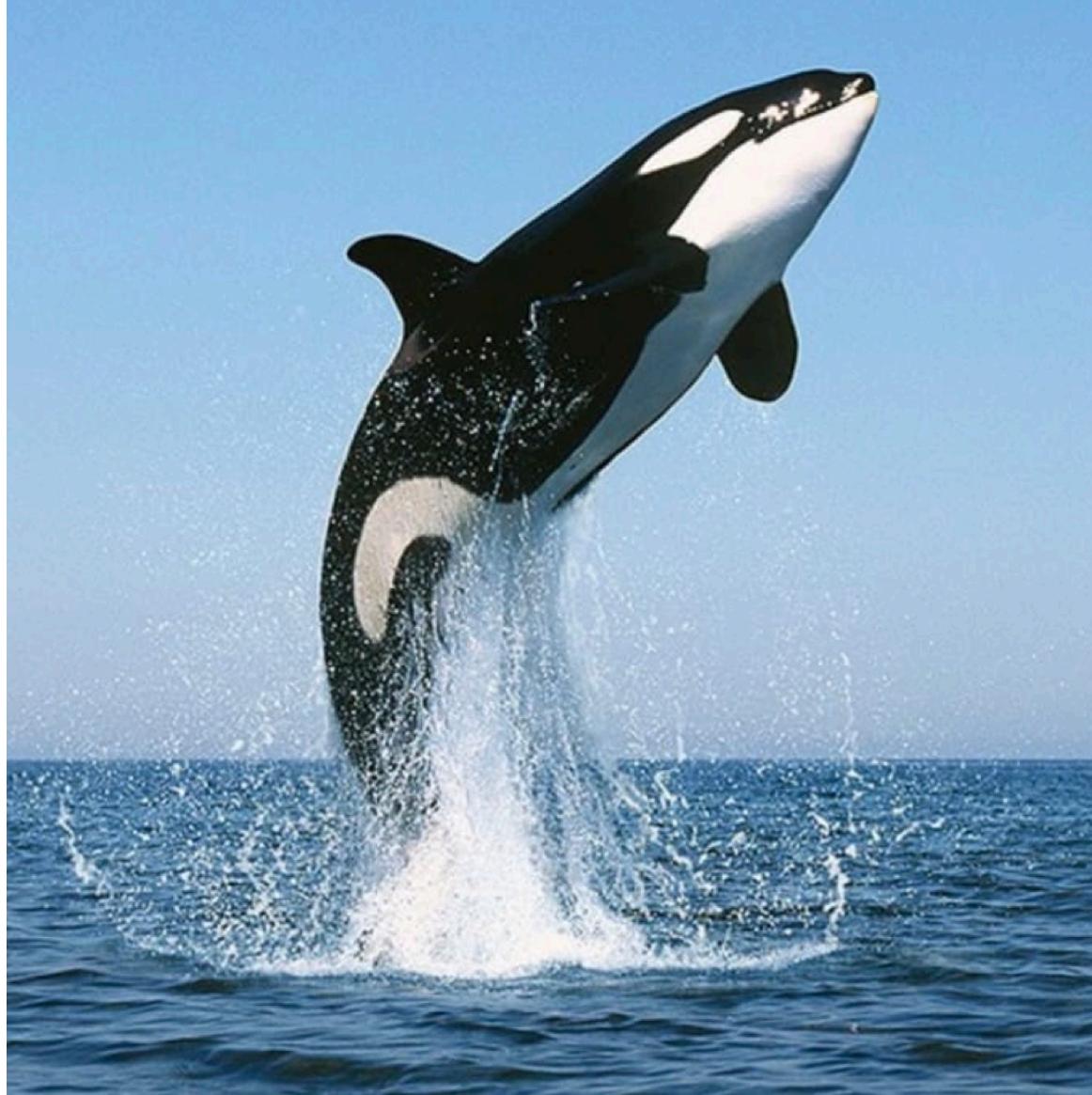
$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

然后你可以把它跟中学学过的牛顿引力公式做个对比——

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

我给你打个直观的比方。牛顿引力公式就好像是一个完美的球体。而广义相对论，就好像是一头美丽的鲸鱼。

你不见得非得知道鲸鱼身上每一处结构的精确尺寸，你没必要学会怎么画鲸鱼，但是你可以欣赏鲸鱼的美。



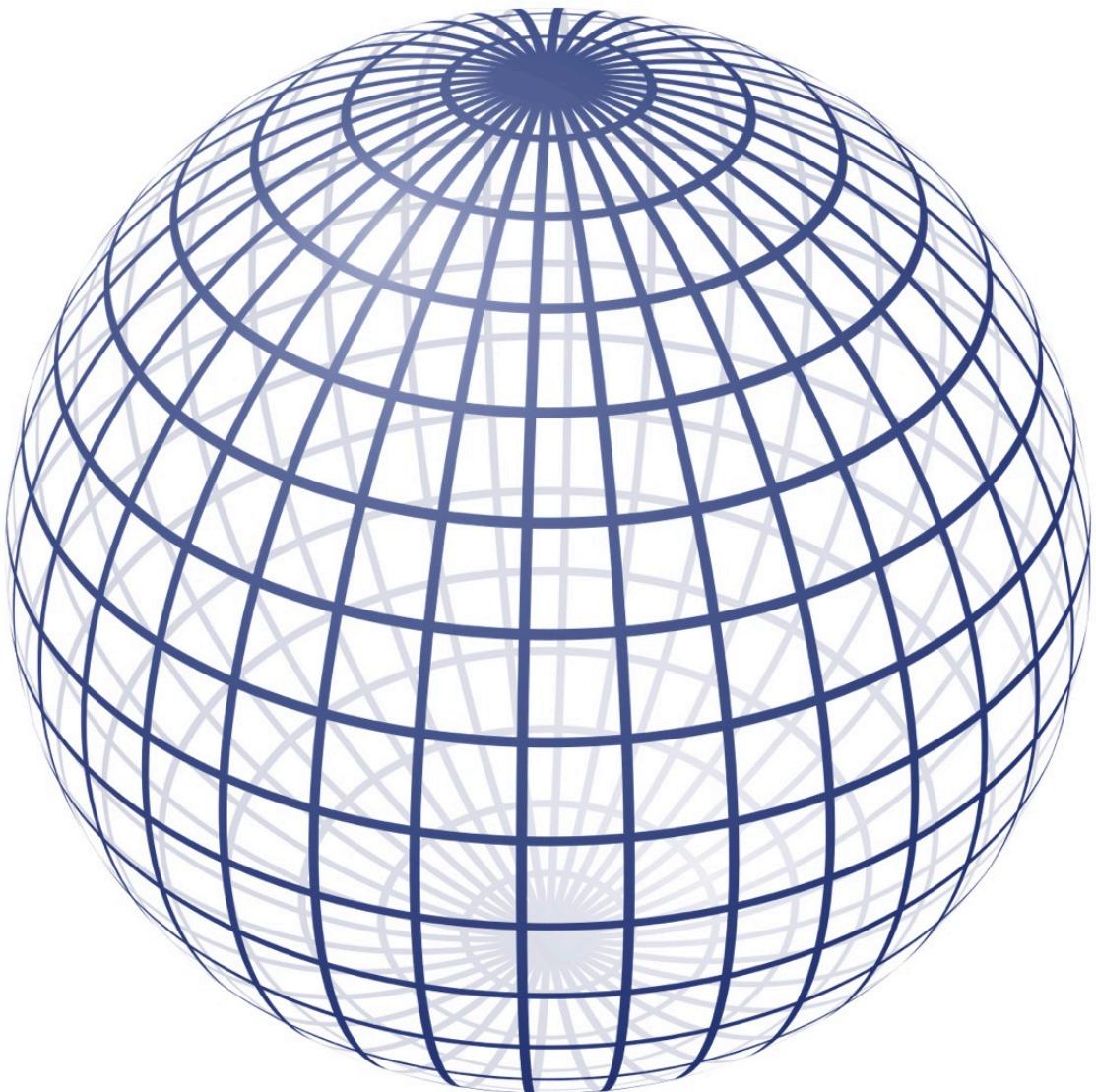
为了理解广义相对论，我们先说一点无比简单、但是不会在高考中出现的几何学。

1. 弯曲的几何

这个关键概念是时空可以是弯曲的。什么叫「时空」的弯曲呢？不用数学语言很难精确描述，但是我们可以做个类比。

一张放在桌子上很平很平的纸，可以代表一个二维平面。只要它足够平，我们在初中学的平面几何知识就都好使。我们清楚地知道什么叫直线。两条平行线永远都不会相交，三角形内角之和等于 180 度。

好，那现在给你一个地球仪，请问这个地球仪的表面，是二维的，还是三维的呢？



你直观的感觉它可能是三维的，因为只有三维空间里才有地球仪……但是数学家可不这么看。我们考虑的仅仅是地球仪的表面。一只蚂蚁在上面爬，它永远也不能离开这个表面。蚂蚁只需要一个经度、一个纬度，两个数字就能描写地球仪上的位置——所以球的表面，其实是一个二维的平面。

它只是不那么「平」而已。它是一个弯曲的平面。

我们生活的这个世界的空间是三维的，如果你把时间也算成一维，那就总共是四维时空。广义相对论并不要求有什么更高的维度，广义相对论只是说，这个四维时空，可以是弯曲的。你可能听说过「超弦理论」，说总共有多达 11 维，其实那些多出来的维都是蜷缩着的，不能算数。

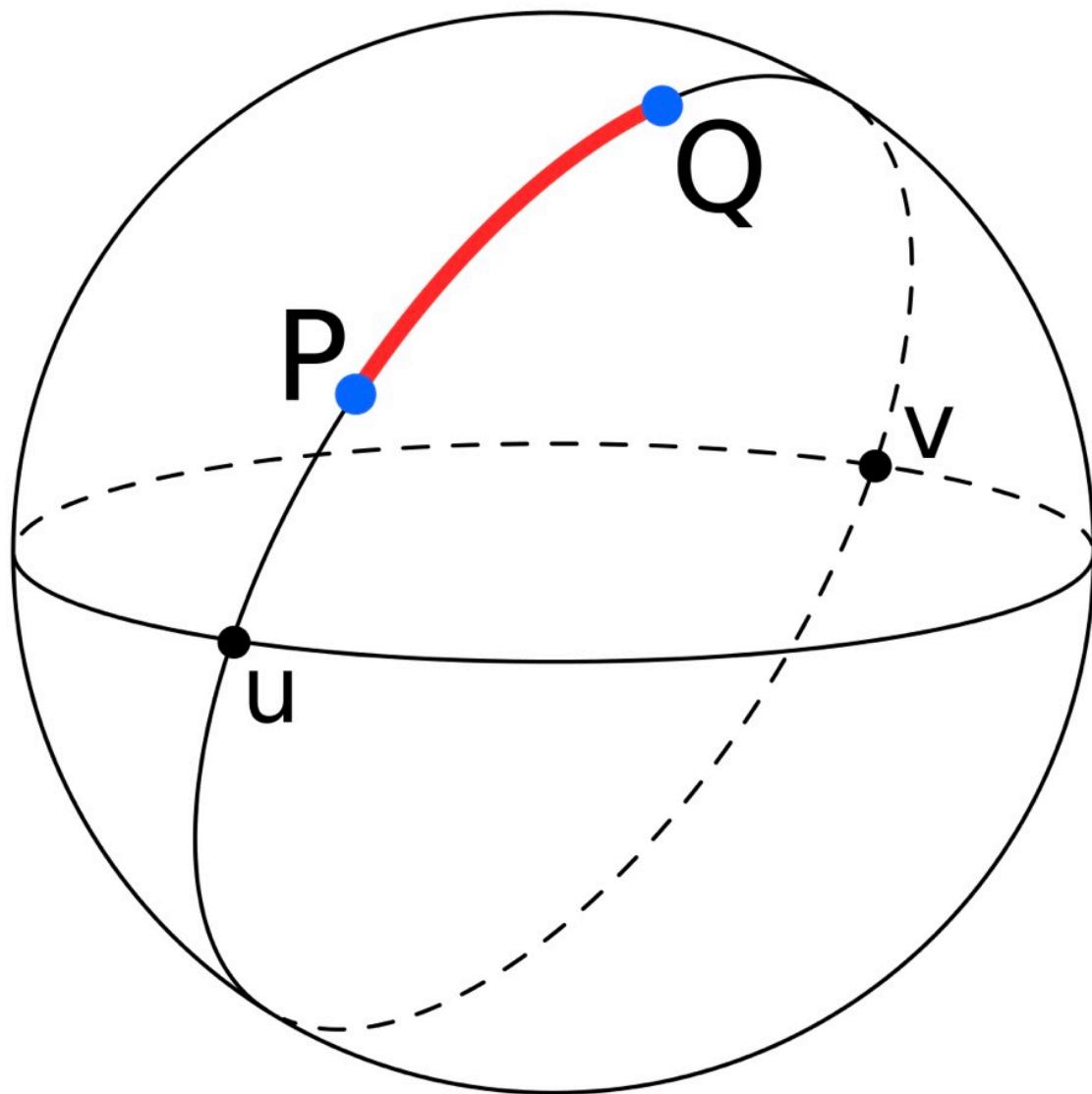
有些科幻小说作家认为四维时空不过瘾，非得给宇宙增加几维，还要搞「降维打击」，那些没什么意思。物理学家早就知道，如果空间大于三维，其中行星绕着恒星公转的轨道就会是不稳定的，也就无法演化出智慧生物来。

怎么理解四维时空的弯曲呢？我们这里只能用弯曲的二维平面做一个类比，但是请记住，弯曲的不仅仅是空间，也包括时间。

哪怕是弯曲的平面上，数学家也可以谈论「直线」——当然没有完全直的直线，但是可以有「最直的线」。比如地球表面是个球面，你从北京去纽约，虽然你不

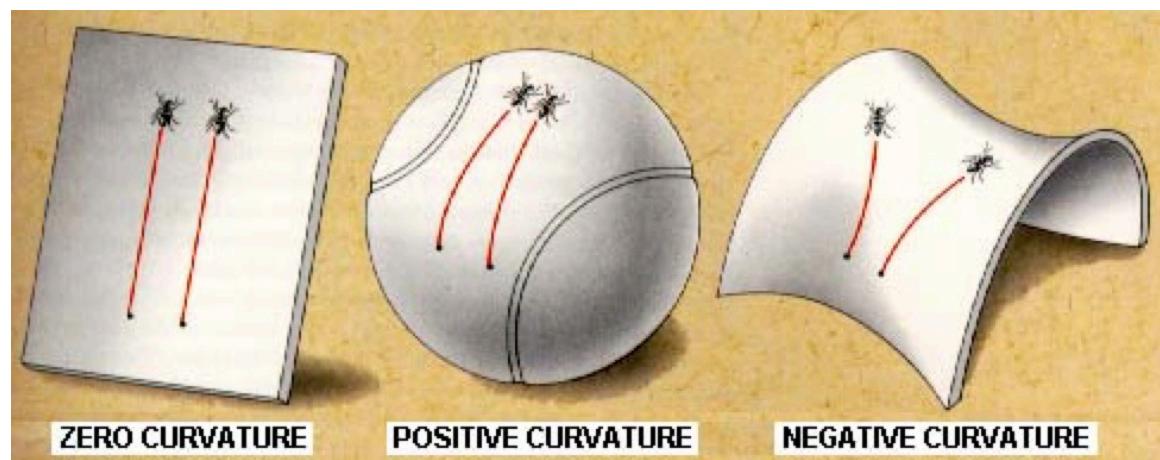
可能弄个地底下的隧道走绝对的直线去，但是仍然存在一条球面上的最短的线路——肯定不是拐来拐去那种。

对球面来说，两点之间最短的线路是走「大圆」，也就是圆心正好是球心的那个圆。比如下面图中两点之间最直的线，就是大圆的一段。



[图片来自维基百科]

哪怕不是球面，各种复杂曲面上，也都有这种「最直的线」，当然就不一定是大圆了，我们统一称之为「测地线」。



[图片来自 starchild.gsfc.nasa.gov]

数学家黎曼——就是提出「黎曼猜想」的那个黎曼——早在 1854 年就已经把

复杂曲面的这些数学研究出来了，我们现在称之为「黎曼几何」。黎曼几何是弯曲空间中的几何学，也是广义相对论的数学基础！在黎曼几何里，两条「平行」的测地线可以相交也可以越分越远，三角形的内角之和可以大于也可以小于 180 度，你看多了就习惯了。

这些基本上就是你理解广义相对论所需要的数学。

2. 广义相对论 ABC

广义相对论，简单地说就是两句话。

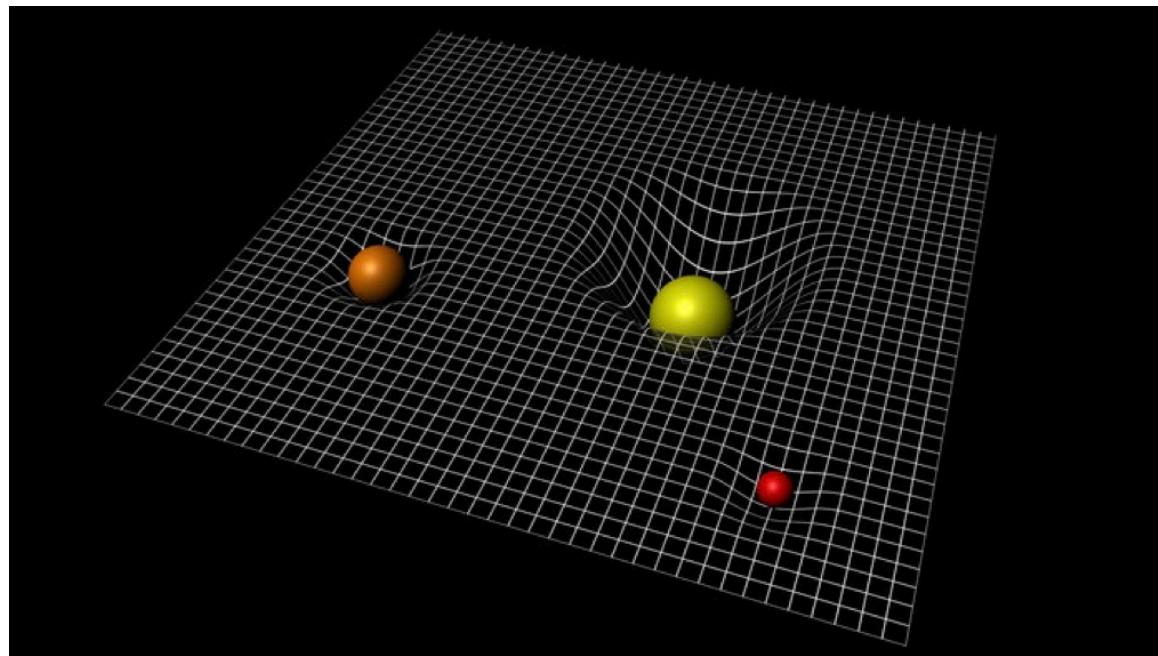
第一，一个有质量的物质，会弯曲它周围的时空。这叫「物质告诉时空如何弯曲」。

第二，在不受外力的情况下，一个物体总是沿着时空中的测地线运动。这叫「时空告诉物质如何运动」。

完了。

这里根本就没有引力的事儿，根本不需要引力。

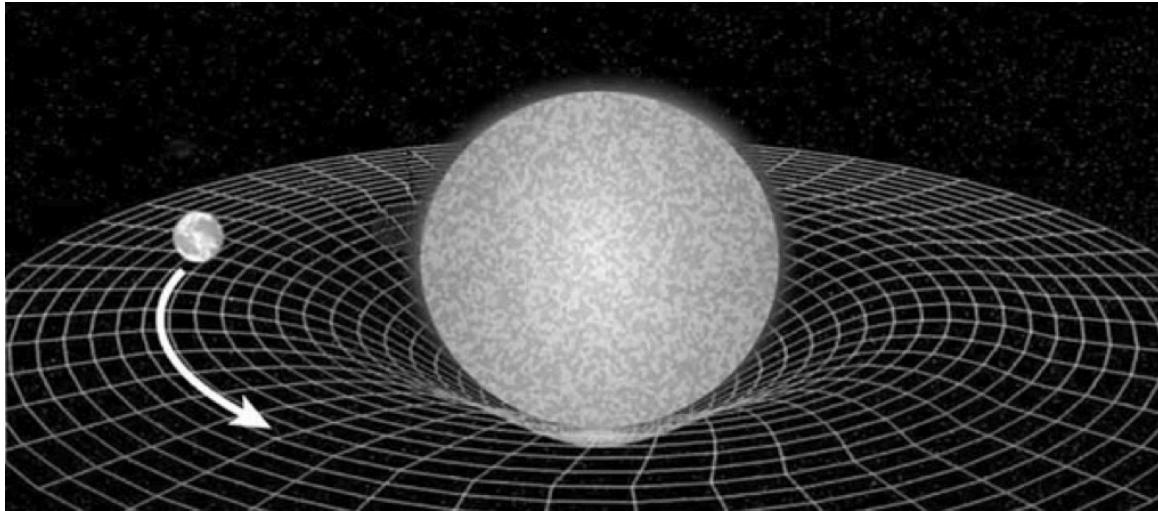
这个画面是这样的。你把时空想象成一个二维的蹦床。本来蹦床是平的，你往上面放几个球，蹦床上有球的地方周围就变成弯曲的了——这几个球，弯曲了各自周围的时空。



[图片来自 www.esa.int]

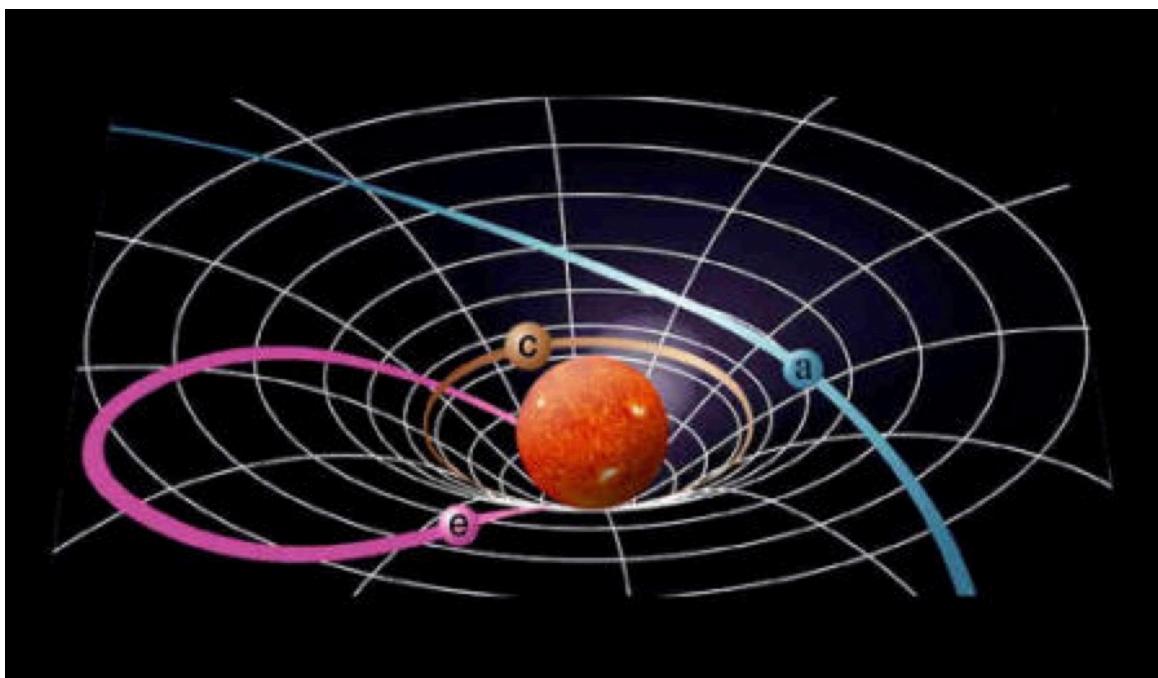
地球为什么绕着太阳转？牛顿认为那是因为太阳对地球有个引力。但是广义相对论说，地球根本不知道太阳在哪里，只是因为太阳把时空弯曲得比较厉害，地球是根据自己所在时空的测地线运动而已。就好像蹦床上的小球可以绕着大球滚

动，而你知道大球并没有吸引小球，那只是因为蹦床上大球的周围有个凹陷！



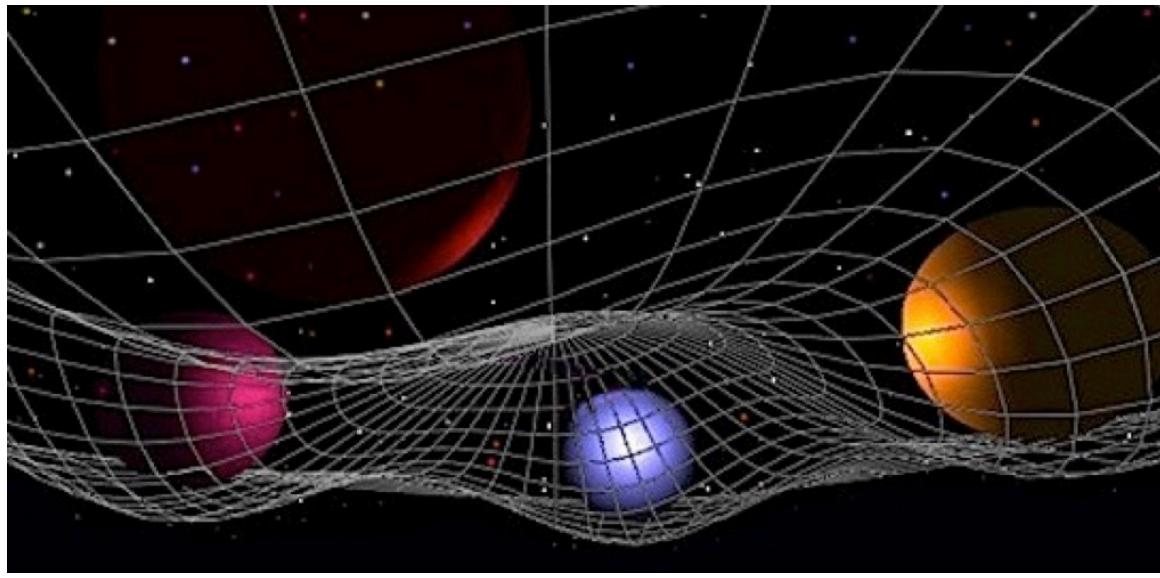
[图片来自 www.uh.edu]

同样的时空，每个物体的速度不一样，它看到的和遵循的测地线也不一样。有的物体会直接掉向太阳，有的会绕着太阳做椭圆运动，有的擦肩而过，这些都只不过是在沿着自己的测地线运动而已。



[图片来自 billadamsphd.net]

当然，每个有质量的物体在弯曲时空中运动的同时，也在弯曲着自己周围的时空，只是弯曲的程度不同。时空的形状由所有这些物质共同决定，然后所有物质都沿着自己周围时空的测地线运动。



[图片来自 Cosmology.com]

我们用蹦床打比方是不得已而为之，物质弯曲时空并不是像小球在蹦床上往下「压」的结果，是自然地弯曲周围所有方向上的时空。而且请注意，被弯曲的不仅仅是空间——还有时间，这个咱们后面再讲。

说到这里我还要澄清一点。有好几个读者问我，既然高速运动物体的质量会增加，那多出来的质量会不会也会弯曲空间呢？答案是不会的。广义相对论里边说的物质弯曲空间，你可以理解成是物质的「静止质量」在弯曲空间，静止质量是所有坐标系都同意的不变量。时空的内在几何形状是绝对的，但是时空在不同的坐标系有不同的样子。

广义相对论就这么简单。

3. 自然运动状态

爱因斯坦再一次看破了红尘。什么是引力？你可以说根本没有引力，有的只是时空的弯曲。

或者你也可以说，所谓引力，就是在大尺度下才能看出来的、时空的弯曲。鲸鱼的身体是曲线的，但是如果你离近了看，它身上每个地方都可以用一个很平的小平面近似。局部的测地线就是很直很直的直线，这就是为什么我们上一讲说局部没有引力。

说到这里，我们要重新定义「自然运动状态」这个概念。所谓自然运动，就是在没有任何外力干扰的情况下，一个物体自由自在的状态。

亚里士多德认为自然的运动状态是静止。这符合我们的生活经验：没有外力的干扰的东西好像都是静止不动的。

但是后来伽利略和牛顿说不对，力并不是让物体运动的原因，力其实是改变物体运动状态的原因。一个物体在光滑的平面上滑动，如果没有任何摩擦力干扰，它就会一直这么动下去。所以匀速直线运动和静止没区别，都是自然运动。

好，现在爱因斯坦告诉你，一切沿着测地线的运动，都是自然运动。

我们可以想象，在太空中找一个周围非常空旷、没有任何星体的地方，这里的时空是平直的，测地线是完美的直线，所以沿着测地线运动正好就是匀速直线运动。

那如果时空是弯曲的，宇航员就会绕着地球转，失控的电梯就会直接掉下去，这两个运动其实都是自由落体，都是非常本分地沿着自己的测地线运动！所以它们虽然有加速度，但是仍然是自然运动。

自由落体，跟匀速直线运动，跟静止，没有任何区别。你在其中一个封闭的实验室里不管做什么实验，都无法把它们区别开来。爱因斯坦说它们是一回事，都是沿着测地线运动，都是自然运动。

反过来说，你站在地面不动，站一会儿就累了，这其实是一种*不自然*的运动。你本来想沿着测地线往下掉，可是地板阻止了你。想要体验真正的自由，你应该搞一个……自由落体运动。

为什么引力质量正好等于惯性质量，为什么一轻一重两个铁球同时着地？因为只要你的质量没有大到能跟地球相提并论、足以显著影响周围时空的形状，你看到的测地线就只跟你的初始速度有关，跟你的质量没关系！

回头再看上一讲说的那两个思想实验。不管你是站在一个有火箭加速的飞船上也好，还是站在地面不动也好，都是有一个外力在阻止你沿着测地线走，所以它们是一样的。在地球附近自由落体也好，还是在空旷的地方做匀速直线运动也好，都是沿着本地的测地线的自然运动，所以它们也是一样的。

只要你接受时空尺寸是相对的，你就能接受狭义相对论。只要你接受时空可以弯曲，你就能接受广义相对论。接受了时空的这两个人性，什么光速为什么不变、惯性质量为什么等于引力质量、引力到底是不是真实的存在、超距作用……这些麻烦事儿就都没有了。

所以说相对论是个简单理论，它只是非常深刻。其实我觉得广义相对论比狭义相对论还容易理解，它只是非常美丽。

也许下次看见鲸鱼的时候，你可以想起广义相对论。

相对论 10~万维钢

爱因斯坦不可能这么幸运

美国物理学家约翰·惠勒是费曼的博士导师，也是「黑洞」这个概念的提出者。惠勒曾经对量子力学有这么一个评论——我们接触量子力学的感觉，就好像是一个从边远地区来的人第一次看见汽车。他会觉得汽车这个东西显然是有用的，而且肯定有重要的用处，可到底是什么用处呢？

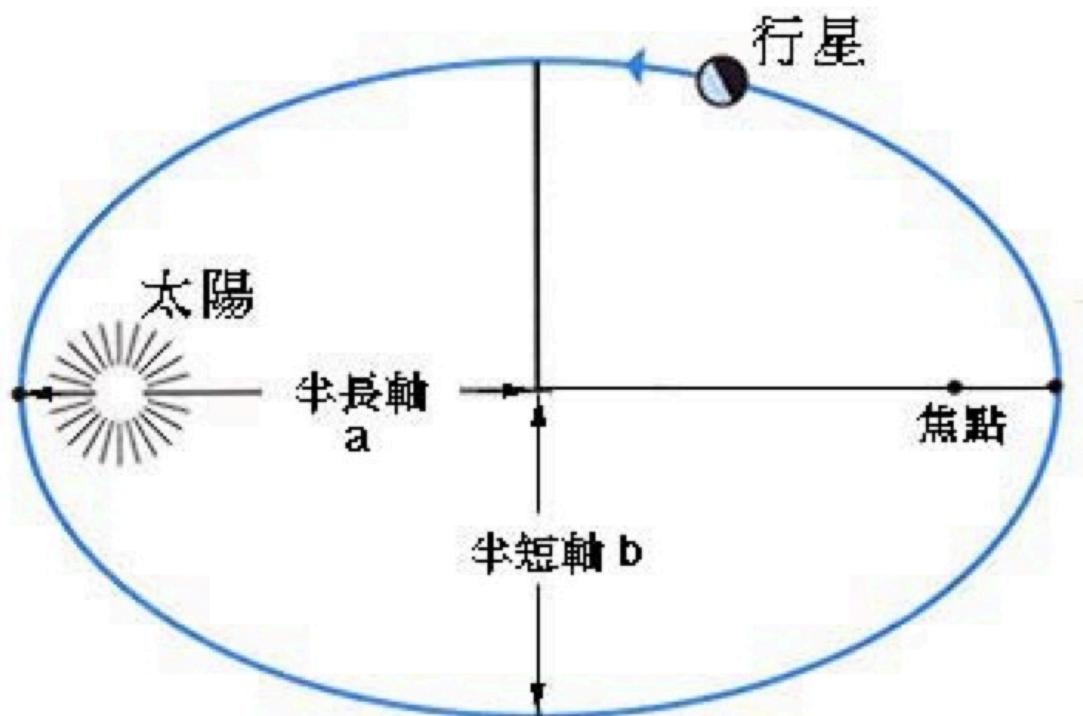
我猜你第一次听说广义相对论也会有同样的感觉。广义相对论的思想跟牛顿引力公式是如此的不一样，这个理论是如此的精妙，它肯定有深刻的内涵，可到底是什么内涵呢？要知道就算你要登陆火星，牛顿力学也足够精确了。

爱因斯坦在 1915 年发表了广义相对论。这时候物理学家们已经普遍承认相对论的价值，但是爱因斯坦在公众眼中并没有什么声望。爱因斯坦就好像是一个互联网圈的创业者，每个了解他的人都承认他的想法是颠覆性的，能「改变世界」，但是没人知道他的公司应该有多大的估值，他还从来没在市场上赚到过钱。

不过爱因斯坦不用等太久。1916 年，爱因斯坦提出，有三件事，能证明广义相对论是对的，牛顿力学是不那么对的。咱们先说其中两件。

1. 水星进动

我们知道行星都在绕着太阳公转。如果你还记得高中物理，你应该知道行星公转的轨道通常不是标准的圆形，而是椭圆。椭圆有个长轴有个短轴，太阳在椭圆的一个焦点上。行星们就这么兢兢业业地、年复一年地沿着自己的椭圆轨道运动。



Zeilik

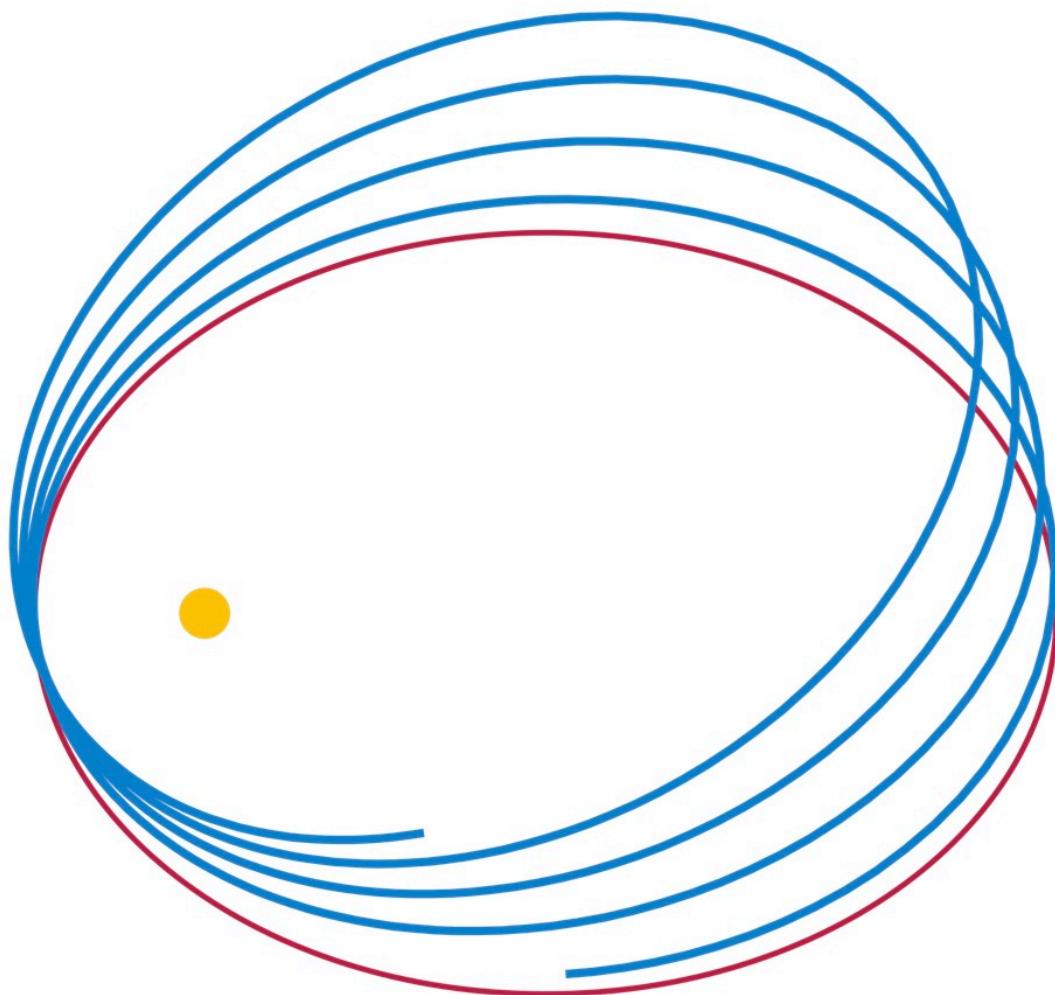
图片来自 www.phys.ncku.edu.tw

牛顿力学告诉我们，相对于太阳，这些椭圆轨道的位置是固定的。

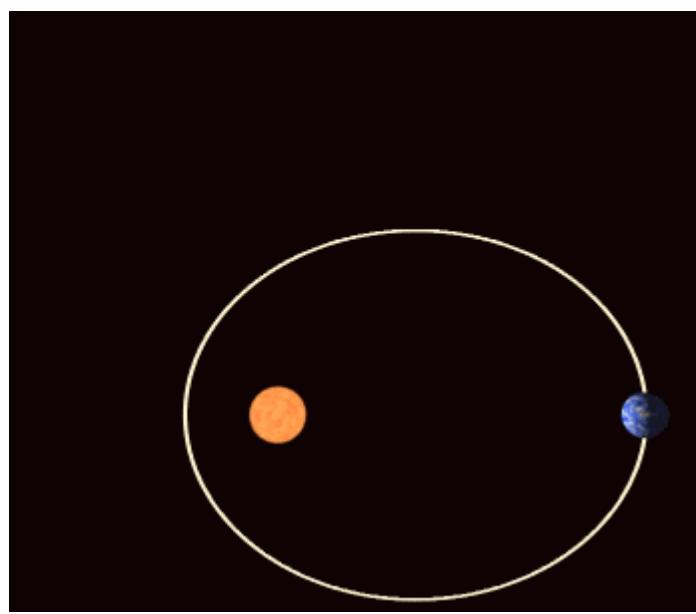
按天文的标准，我们这个太阳的质量不算太大，整个太阳系内部的引力都不算太强。而只要引力不是特别强，广义相对论的计算结果跟牛顿力学都高度吻合，也是一样的椭圆轨道。但是广义相对论有个很微妙的性质——用广义相对论算出来的椭圆轨道，并不是真正闭合的。

也就是说，行星公转一圈之后并不是恰好回到原来的出发点，会有一个小小的偏移！表现出来，就是椭圆轨道并不是完全固定的，每一圈都跟前一圈有个小小的差别。椭圆的长轴，会有一个慢慢的转动——物理学家称之为「进动」。

下面图中红色椭圆代表牛顿力学计算出的行星轨道，蓝色的线代表有进动的行星轨道——



下面这张动图是对行星进动的一个夸张的演示——



来自维基百科

事情是这个事情，但情况是行星轨道的进动通常都非常、非常小，几乎就是无法观测的。

话分两头。另一方面，天文学家早在 1859 年就观测到，太阳系里距离太阳最近的行星，水星，一直都有一个进动。

但是 19 世纪的天文学家已经在很大程度上解释了水星的进动。因为水星附近还有其他行星，比如金星和地球，这些行星对水星也有引力，会干扰水星的轨道。天文学家精确计算了这些干扰，最后只剩下一点点进动，可以说是牛顿力学无法解释的。

这一点点有多大呢？是每一百年，进动 43 弧秒。这是个什么概念呢？我们知道圆周有 360 度，然后一度分为 60 弧分，然后一弧分再分成 60 弧秒。100 年 43 弧秒，这是一个几乎无法察觉到的差距。但是天文学家对自己的计算非常有把握，他们认定，这 43 弧秒需要一个解释。

结果 1916 年，爱因斯坦做了一个计算，得出，因为广义相对论效应导致的水星轨道的进动……正好是每 100 年 43 弧秒！

2. 光线弯曲

水星进动这个证据好是好，但是老百姓不容易理解。爱因斯坦提出的第二个证据，就非常直观了。

广义相对论要求时空可以是弯曲的，一切物体都要沿着时空中的测地线走——一切物体，其中就包括了光。如果这个地方的测地线是弯曲的，那么光线就也会是弯曲的。比如说，如果这里有一个大质量的星球，那么远方的星光经过这个星球

附近的时候，就可能发生偏折。

这件事牛顿力学里可是绝对没有，人们一直都认为光在真空中永远走直线。

不过如果你把牛顿引力公式和狭义相对论放在一起，其实也能预言光线的弯曲。狭义相对论说质量就是能量，反过来也可以说能量就是质量。光没有静止质量，但是有能量啊——如果我们*强行*用光子的能量除以 c^2 ，也会得到一个光子的「运动质量」，就好像是一个有质量的物体一样。

那既然有质量，就应该能感受到引力，牛顿引力理论足以给它一个偏转——就好像彗星略过地球一样。

那广义相对论还有啥用呢？所幸的是，广义相对论预言的光线偏转，是「牛顿引力 + 狹义相对论」预言结果的两倍！

这样我们就有了三个直截了当的说法——

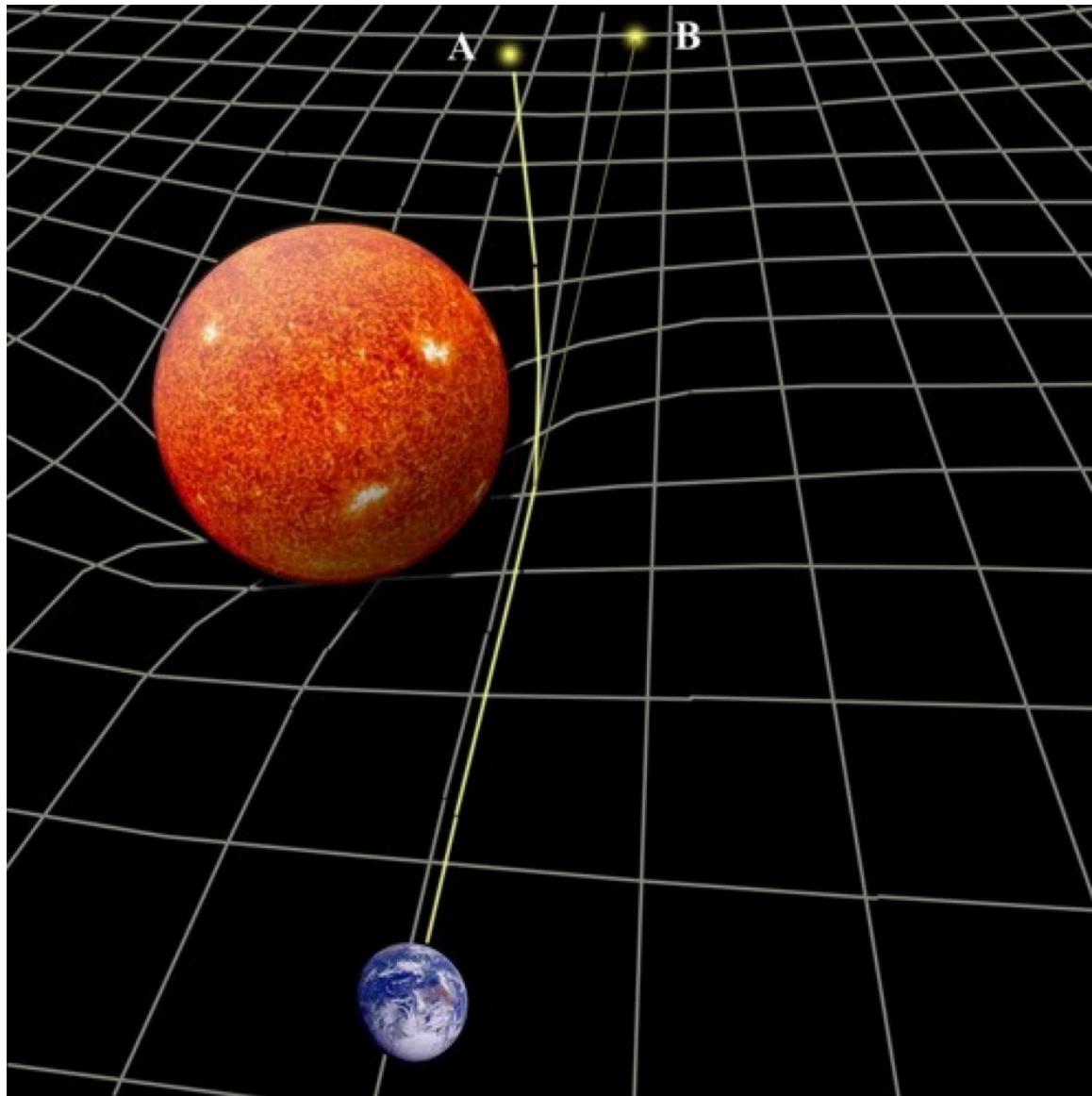
* 牛顿力学：光永远走直线

* 牛顿引力公式 + 狹义相对论：光线会被偏转，但偏转的程度较小

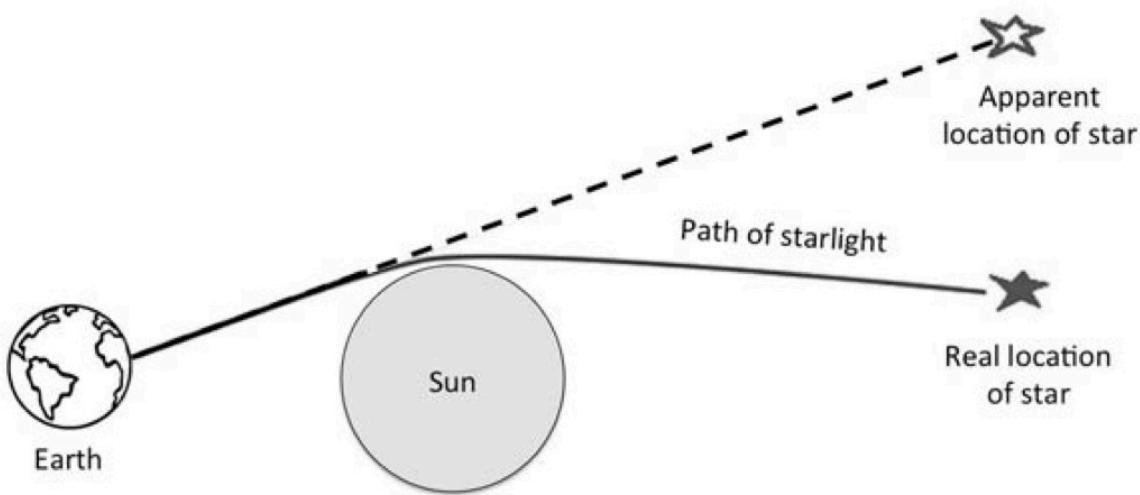
* 广义相对论：光线会被偏转，而且偏转的程度较大

所以现在只差一个观测验证。可是上哪找能让光线明显偏转的大质量的星球呢？月亮经常跟星星在一起，但是月亮的引力太小，偏转星光的效应看不出来，别的大质量星球都距离我们太远。当时的天文学家唯一能指望的就是太阳。

比如说，从地球上看来，太阳的背后方向有一颗星，它到地球的星光如果走直线的话会被太阳挡住，我们根本看不到。但是因为相对论效应，如果星光有一个偏转，那我们就能看见这颗星，这不就证明了吗？



图片来自 http://www.lukemastin.com/physics/topics_relativity_general.html



图片来自 <https://www.bbvaopenmind.com/en/the-eclipse-to-confirm-the-general-theory-of-relativity/>

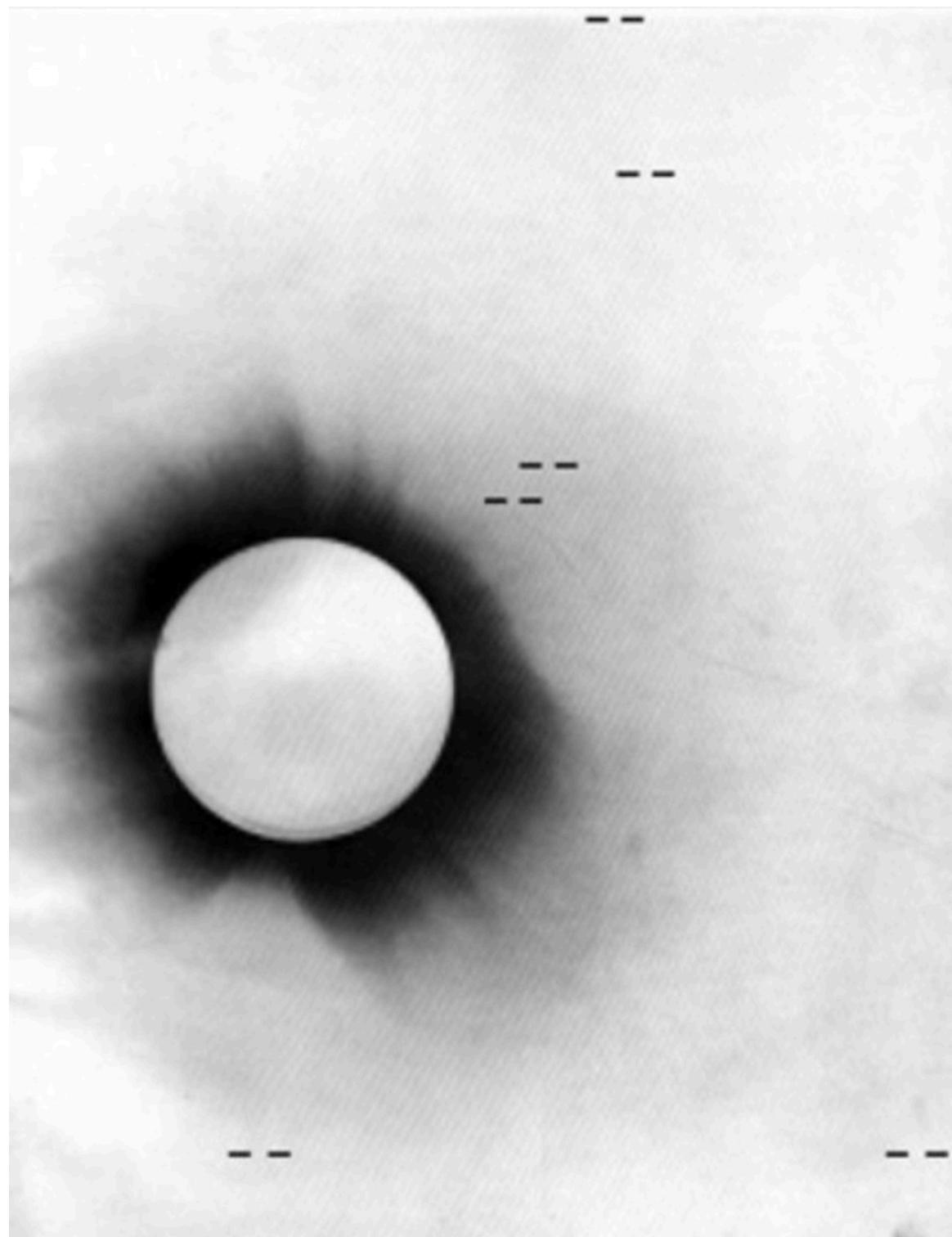
这个思路好是好，可问题在于太阳太亮，它周围的星光都被太阳给掩盖了。

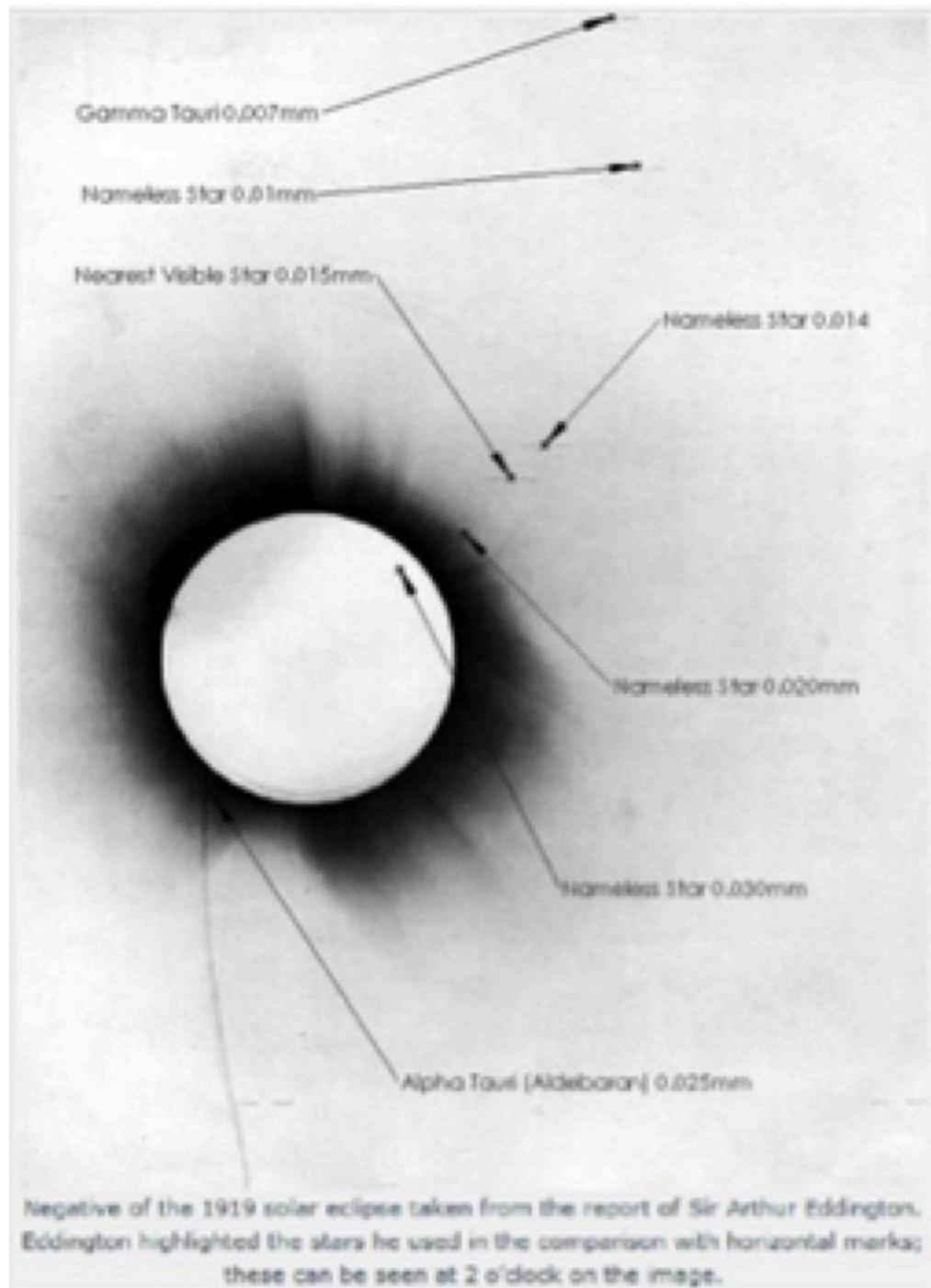
但是天文学家想到一个极端的情况，日全食。

日全食的时候，月亮会帮我们挡住太阳光，使得我们能看见太阳周围的星光。那如果我们事先算一算这个时候有哪些星星应该在太阳背后，你本来应该看不见，结果却在太阳周围看见它们了，这不就说明太阳弯曲了星光的路线吗？

爱因斯坦 1916 年计算出光线弯曲的正确结果，然后 1919 年 5 月 29 号，就有一次日全食。那时候第一次世界大战刚刚结束，英国天文学家爱丁顿，专门说服英国政府给了一笔经费，组织了两个观测团队，一个去巴西一个去非洲，专门为了验证广义相对论观测这次日食。

结果爱丁顿的团队就真的看到了原本不该出现在太阳周围的几颗星——





爱丁顿在皇家科学院宣读了观测结果，证明是广义相对论说得对。英国泰晤士报的报道用了个通栏标题——《科学革命——关于宇宙的新理论——牛顿思想被推翻！》

爱因斯坦一夜成名。

3. 爱因斯坦的运气

咱们现在考察广义相对论被世界接受的这段历史，你不能不承认，爱因斯坦的运气实在是太好了。

首先是这次日全食。爱因斯坦的计算结果刚出来三年，就赶上了日全食。我特意查了一下，地球上一次有日全食得等到 1937 年 6 月 8 日。爱因斯坦动作稍慢一点，或者爱丁顿未能促成这次观测，相对论搞不好就得再等 18 年才能被人接受。

而这一次日全食发生的时候，太阳周围正好是毕宿星团的星星——这个星团特别亮！再等下一次，还没有这么强的星光让你容易测到。

更巧的是，爱丁顿选择的这两个观测地点，在日食发生前后都是阴雨天气。巴西那个地方在日食当天早上还是多云，可是在日食发生前一分钟，天空中太阳那个位置的云居然散开了，给天文学家开了一小片晴天。非洲那个地方也是有云，也是恰好在日食期间让太阳露出来一小会儿。

爱因斯坦要是个中国人，他也许会说一句「天助我也」。

而且人和也很重要。如果爱因斯坦是个注重声望的人，他除了感谢爱丁顿还应该感谢泰晤士报。「牛顿被推翻」这个标题直接把爱因斯坦送上了牛顿之后最伟大的科学家的位置。如果咱们「得到」报道这次科学发现，肯定不会用这个充满民科味道的标题，最起码应该用《光线可以被引力弯曲！》

我曾经听后来的人分析，爱因斯坦之所以能在短时间内从「世界上最了不起的物理学家」变成「世界伟人」，跟他 1921 年访问美国的旅程关系很大。美国媒体和美国老百姓都非常喜欢爱因斯坦……不过那时候他们并不怎么了解一般的科学家都什么样。

不论如何，爱因斯坦配得上所有这些幸运和荣誉。但我还是想说，爱因斯坦最大的幸运，是他生在了那个时代的欧洲。

天文学家之所以能在 1856 年（大清咸丰六年）发现水星进动，是使用了从 1697 年（大清康熙三十六年）到 1848 年一百五十年的水星活动记录。这个发现非常不容易，你要知道水星的轨道几乎就是一个圆形，并不怎么「椭」，那些古代的天文学家首先得准确判断这个椭圆的长轴在哪里，然后还得记录这个长轴的变化。

然后他们还能精确计算金星和地球引力对水星轨道的影响，最后得出一个非常非常小，但是无比坚定的，跟牛顿力学的差异。而且那时候可没有什么计算机。

想想相对论的历史，你肯定会感叹「爱因斯坦不可能这么幸运！」但是别忘了精英日课以前说过，幸运是这个宇宙的通行证。

现在广义相对论既然被接受了，咱们下一讲不管讲到它的什么离奇的推论，你都得接受。

相对论 11～万维刚

黑洞上的诗意

每隔四年就会有一个世界杯足球赛冠军和一大堆奥运会金牌，每年都会有十几个人得到诺贝尔奖。而有些英雄壮举，在人类文明的历史上只可能发生一次。

1610 年，也就是大明万历三十八年，伽利略用六个星期写成了一本书，叫《星空信使》。这本书介绍了伽利略用世界第一台望远镜看到的东西。他告诉人们天上有无数颗距离地球很远的恒星，月球上有山，木星有自己的卫星，金星有相位，太阳有黑子——这些证据表明太阳可能只是一颗普通的恒星，我们看到的行星都是绕着太阳转。

而当时的人还都以为一切天体都是绕着地球转的光滑球体。要论一本书改变人的宇宙观，再也不会有人能超过《星空信使》了。

广义相对论在 1919 年之后很快就成了天文学家的常规工具。它比望远镜复杂得多，带来的天文发现是一个一个慢慢地冒出来的。

但是，广义相对论告诉我们这个宇宙的消息，像《星空信使》一样震撼。比如说，黑洞。黑洞有什么神奇之处呢？我们会从广义相对论最基本的假设出发，一步一步推导出一个让人不敢想象、但是又充满诗意的情境。

1. 红移和蓝移

广义相对论也有一个时间膨胀效应。空间弯曲得厉害、也就是引力场强的地方的时间，会比引力场弱的地方要慢一些。用老百姓的话说，就是高处的时间会比我们在地面上的时间快一些。

想要理解这一点，首先你得知道物理学上有一个现象叫「多普勒效应」。接下来的推理过程非常有意思，不要错过爱因斯坦的精妙思想！

多普勒效应是说，对于一个什么波，如果它是向你而来的，因为每一个周期都变短了一点，它的频率就会提高；如果它是离你而去的，频率就会降低。

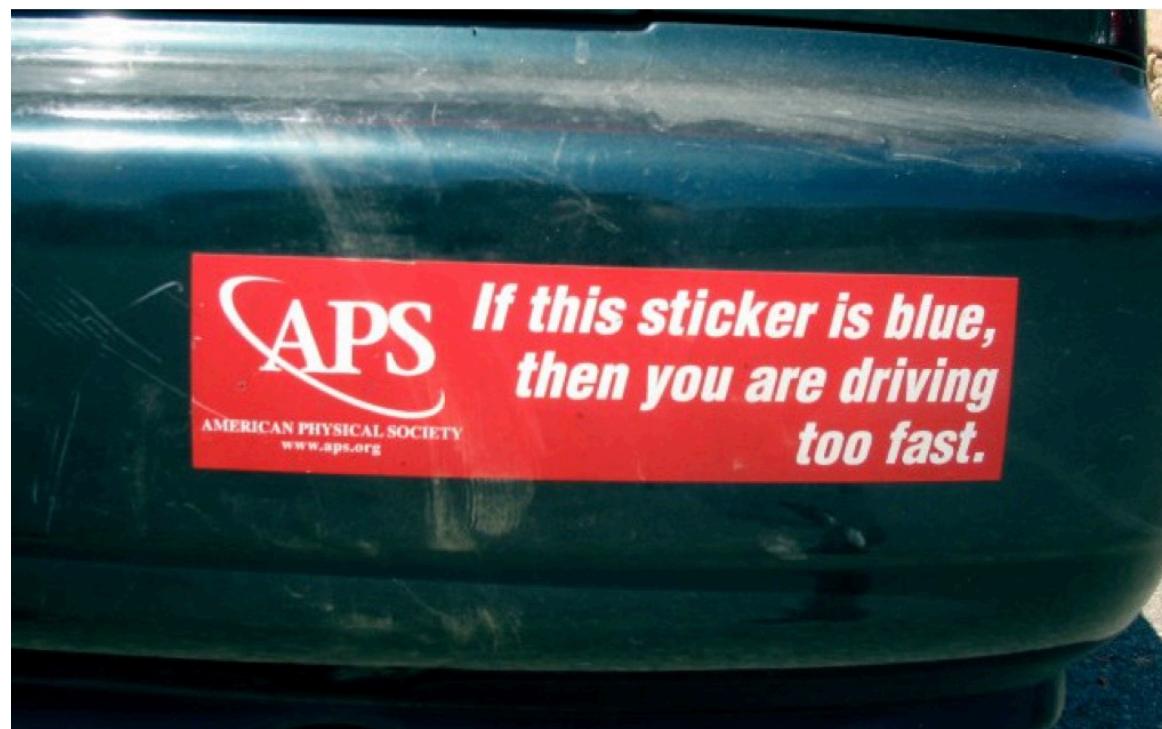
比如一辆火车向你开过来，你听它的汽笛声会更尖锐一些；火车离你而去，汽笛声就变低沉。

光波也是这样。我们现在知道光的速度是不变的——但是光的频率可以变。如果

发光点是向你走过来，光的频率就显得就更高一些，表现出来，就是你看到这个光的颜色会变得更蓝一点，这个叫「蓝移」。而如果发光点是在离你而去，光的频率就会变低，表现在颜色上就会发红，叫「红移」。

天文学家正是通过红移和蓝移，来判断宇宙中哪些星星是离地球而去，哪些是朝着地球飞来。

说到这里有个物理学家喜欢的冷笑话。美国物理学会曾经弄了一个红色的汽车保险杠贴纸，上面写着「如果你发现这张贴纸是蓝色的，那你就开得太快了。」



不知道你能不能体会到笑点。总而言之，你可以通过光的颜色变化判断光源和你之间的相对速度关系。

2. 引力红移

现在我们回到之前说的那个在自由落体的电梯里的思想实验。我们想象，电梯从地板向天棚射出了一束光。下面咱们考虑两个场景。

场景一，电梯是处在一个没有任何引力的空间里，它是自由自在地匀速直线运动。那我们可以想象，这束光应该既没有红移，也没有蓝移，就是本来的样子。

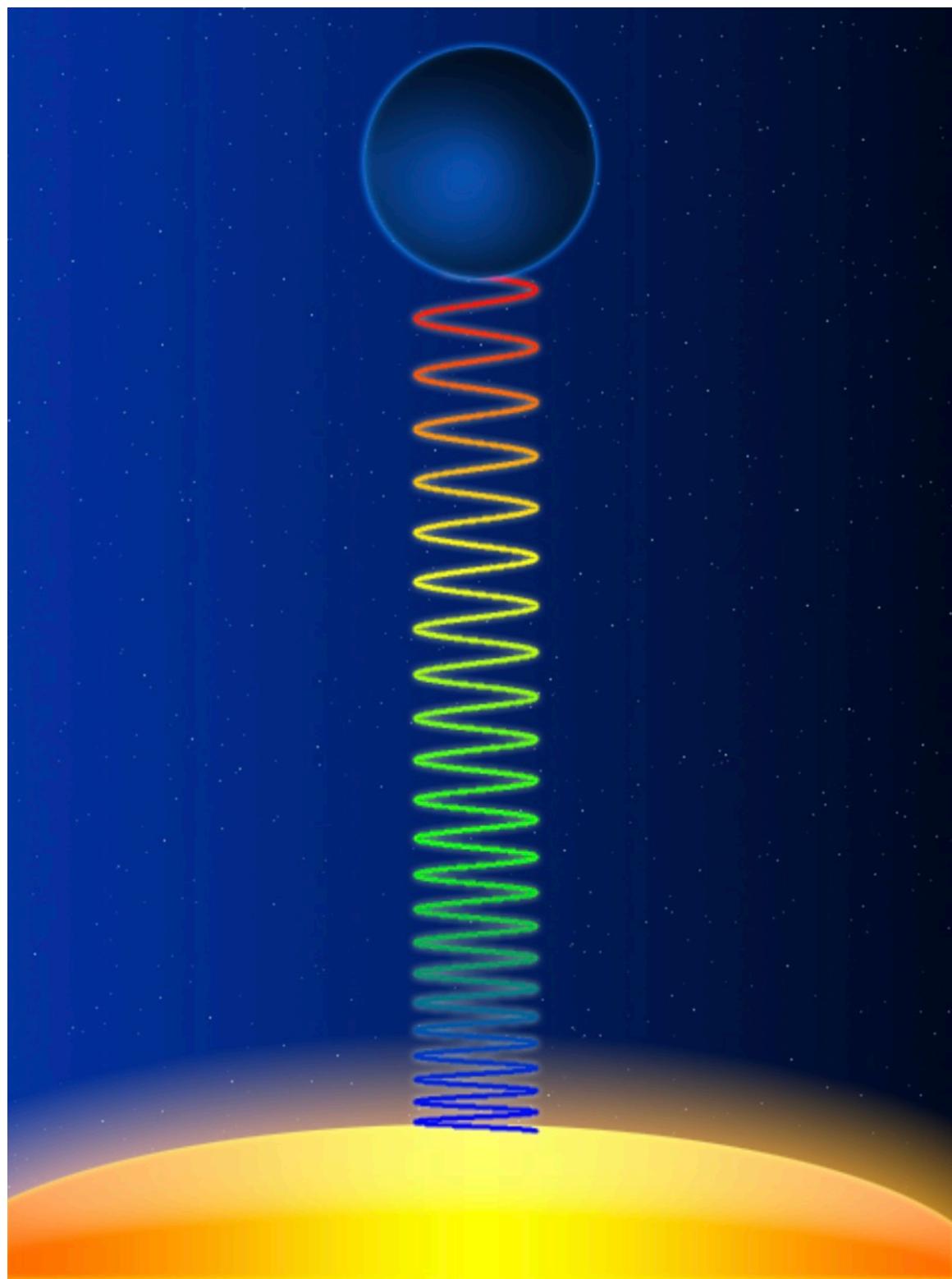
场景二，电梯是在地球的引力场中做自由落体运动，它会有一个从上到下的加速度。天棚就会加速冲向那一束刚刚离开了地板的光波。当然，天棚看到的光速还是一样的——但是，天棚会觉察到这束光有一个蓝移。

好，这就有问题了。根据等效原理，场景一和场景二的电梯里面的物理学应该完全一样，应该是你不管做什么实验都不会发现二者有什么区别。那场景二的这个蓝移，是怎么回事儿呢？

一般人想到这里可能会说，啊，这说明等效原理不对——所以一般人不是爱因斯坦。爱因斯坦非常相信等效原理。

所以爱因斯坦说，场景二也应该看不到光的蓝移。为了做到这一点，场景二中的引力场，必须提供一个红移，去抵消加速运动带来的光的蓝移！

为此，爱因斯坦要求引力场——或者说弯曲的时空——必须具备一个性质：它必须带有红移！这就是「引力红移」。



也就是说，身处引力场中，从高处看星体发出来的光，会有一个天然的红移。

这也就是说，同样一束光，我站在高空中看，会觉得它的频率变慢了。

而这也也就是说，如果你在地面做什么事情，我在高空看你，会觉得你是在做慢动作。而你在地面看我，会觉得我是在做快动作。

这也就是说你老得比我慢。

这也就是说引力能导致时间膨胀。

引力红移在地面附近导致的时间膨胀和高度成正比，距离地面越高的地方时间过得越快。

这个效应精确到什么程度呢？你拿两个对好了表的原子钟，一个放在地面，一个放在几十米高的楼上——你都能发现他们走时的区别。因为巴黎和伦敦的海拔高度不同，它们的时间每天相差 1 纳秒！物理学家还曾经把卫星发射到太阳附近去验证广义相对论的时间膨胀效应，结果跟理论非常吻合。

GPS 卫星距离地面很远，时间膨胀效应很强，所以计算时间必须考虑到广义相对论的修正。没有这个修正，定位精度就会差出去十几公里！这也是能让老百姓直接用上广义相对论的一个例子。

我们还能彻底解释前面讲过的双生子效应。为什么哥哥一调头，就发现地球上的妹妹就突然变老了很多？因为哥哥这次调头是一次剧烈的加速运动，而加速运动等效于一个强引力场。哥哥相当于是处在一个大质量天体的表面，而妹妹相当于是站在高处看哥哥——妹妹感受到了引力红移。

如此说来，生活在山顶的人，要比生活在山脚下的人老得快一些。说到这里，我们之前说的经常在天上飞的飞行员和空姐会因为高速运动比我们年轻一点，这就不一定事实了——得取决于高速运动变年轻和飞得高变老这两个效应哪个更强。美国国家标准局的科学家做过研究，说哪怕是每小时 40 公里的速度，或者 30 厘米的高度，都足以对原子钟产生可测量的影响——而对普通航班来说，高度的影响比速度的影响略大一点点。一个飞行了一千万英里的人，也就比地面上的人老 0.059 秒 [1]。

当然所有这些效应在地球上、包括在整个太阳系里都是不明显的，你完全不必为生活在一个高海拔地区而感到难过。就连太阳的引力都不算强。

3. 黑洞

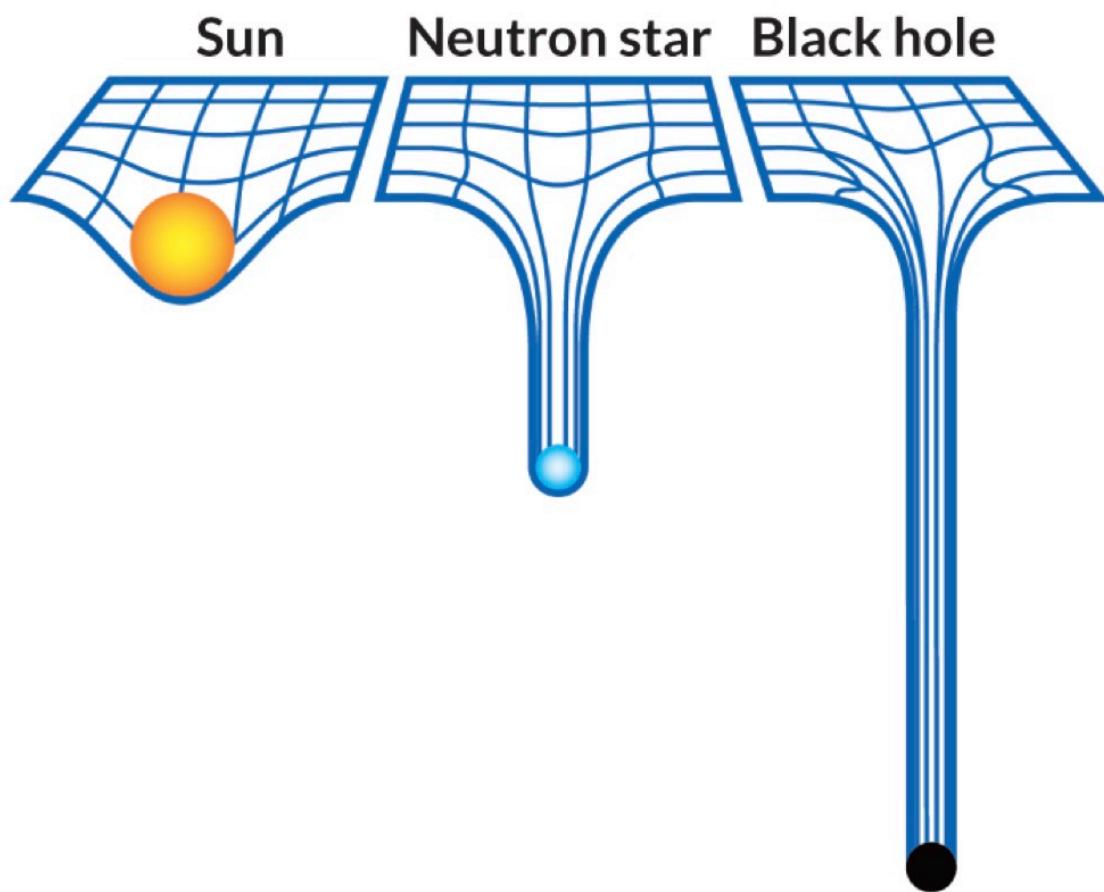
一个星体的质量越大、自身的尺寸越小，它对周围空间弯曲的程度就越厉害。所谓「黑洞」，就是它把周围空间弯曲得实在是太厉害了，以至于连光线都无法从里面出来。



黑洞边上的光圈和一颗行星，图片来自电影《星际穿越》

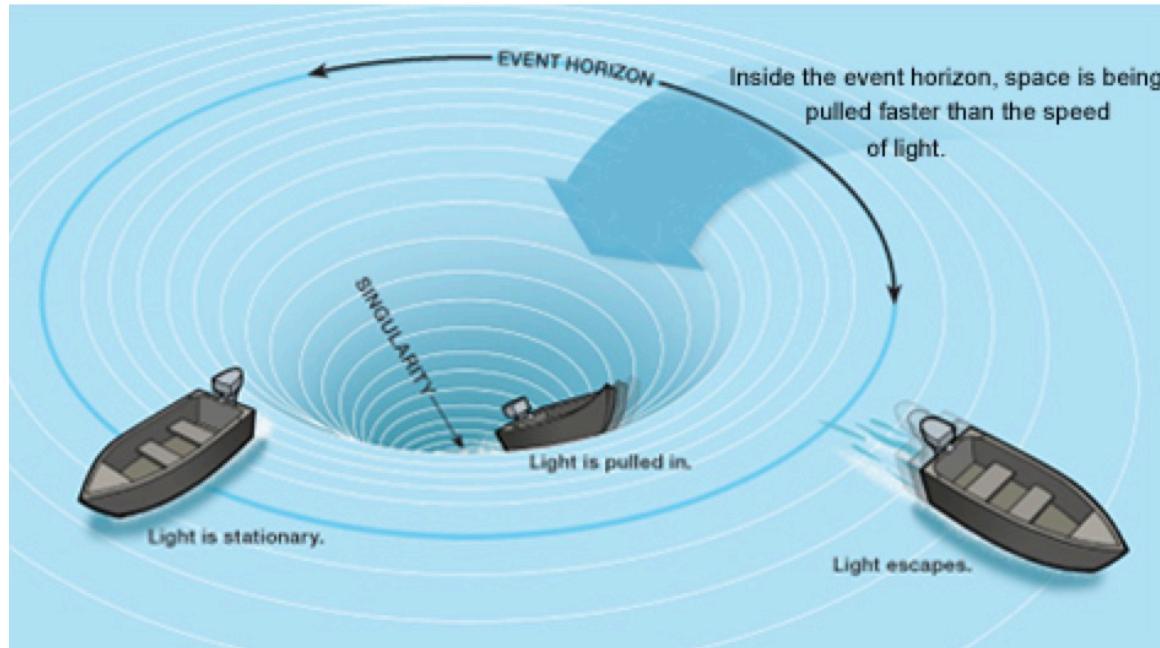
从外面看，黑洞本身是一个……黑黑的洞。但是如果黑洞附近有别的物质，比如说星际间的气体或者带电的粒子，你会看到它周围有一个光圈。那些光是来自带电粒子加速运动产生的辐射。

下面这张图表现了普通恒星、质量大体积小的中子星、和黑洞对时空的弯曲——



图片来自 sciencenews.org

有关黑洞的知识霍金曾经讲了很多，咱们这里就不细说了。但是你需要知道一个概念：「事件世界（event horizon）」。所谓事件世界就是分隔黑洞内外的一条界限。事件世界以外，至少光还可以离开黑洞；而不管什么东西一旦进入事件视界，就再也不能逃脱黑洞了。



好，现在我们来思考一个特别有诗意的事儿——其他地方不会带给你这样的感受：掉入黑洞，是一种什么样的体验。

比如说，你前往黑洞一游，我坐在远处的太空船里看着你。



因为强烈的时间膨胀效应，当你接近黑洞的时候，我会看到你的动作变得越来越慢。你会比我老得慢！

接近黑洞不一定就会掉进黑洞里。事实上因为黑洞的尺寸往往比较小，想掉进去也不容易。你完全可以把黑洞当做一颗普通的行星，你绕着黑洞转几圈。你完全是自由落体运动，不会感到任何不适。但是因为黑洞引力场太强，你转的这几圈，在我眼中可就太漫长了。如果你转两圈就回来找我，可能我已经老死了，而你归来仍是少年。

但是如果你觉得在外围转两圈不过瘾，你想进入事件视界看看黑洞里面是什么情况，那可就麻烦了。

在事件视界上，你的时间膨胀将会达到无穷大。

也就是说，当你跌入黑洞的时候，我看到的是你越走越慢、越走越慢，最后你的身影将永远停留在事件视界上。我感觉你在那儿再也不动了……你的形象永远都保留在我的世界中。你那一瞬间，是我的永恒。



但是时间膨胀是相对于我而言的，你自己不会感觉到这一点，你只会自然地跌入到黑洞中去。经过事件视界的那一刻，你不会有任何异样的感觉。黑洞并没有在边界线给你举行欢迎仪式，你看到的黑洞内部也可以有光线，你眼中的事件视界内外没有什么区别。

然而这是一条有去无回的路。你将会被黑洞杀死。但你不是撞到地面摔死的。黑洞把空间弯曲得太厉害，以至于你身体下半部分的引力会比身体上半部分的引力强很多，这个引力的差异会把你撕裂……

我们无法直接观测到黑洞，但是我们可以从黑洞附近的星体运动方式判断它的存在。天文学家已经有充分的证据，在宇宙中找到了很多个黑洞。

有关黑洞的知识都是别的物理学家研究出来的，爱因斯坦没有回头看相对论带来的这场爆炸。他只想做最重要的研究，咱们下一讲再说。

相对论 12～万维刚

爱因斯坦的愿望

你做没做过那种特别厉害的事儿。比如说，在一场关键篮球比赛中投中绝杀球、在公司的一次重大决策中力排众议做出正确选择、用一个充满个人风格的表演征服观众。如果你做过一次这样的事儿，你就会只想再做一次。而如果你已经做过两次，你就会认为这就是你唯一该做的事情。

爱因斯坦用狭义相对论改变了世人的世界观，然后用广义相对论再一次改变了世人的世界观。这样的事儿他做过好几次。也许征服物理学的世界，就是爱因斯坦唯一该做的事情。

十多年前流行的一本叫《创新者的窘境》的书，说过这么一个道理。一个因为坚持了某种理念而获得成功的公司，往往会执着于这个理念。这个理念本来是一个创新，曾经给企业带来了巨大的成功。但是到了后来，它往往又会成为包袱，会阻碍你去尝试新的创新。

所以我们到底应该坚持、还是不应该坚持理念呢？我敢说，任何号称能给这个问题提供解决方案的人都是骗子。这里面没有可以机械化操作的方法，你只能自己选择。

相对论我们快要讲完了。相对论的发现旅程，即使在物理学家中都是绝无仅有的，这是一个充满爱因斯坦个人风格的探索。总结来说，这个风格有两条——

第一，要统一。爱因斯坦总是想用一个「更一般」、或者说「更广义」的理论、用几个最基本的原则去统一描述看似完全不同的物理现象。

第二，要决断。只要你相信最初的原则是对的，那不管推导出来什么离奇的结果，你都只能接受。就算当时的实验条件验证不了，将来总有人能验证。

我觉得这两条简直可以叫「爱因斯坦主义」。可是爱因斯坦应不应该坚持自己的主义呢？

1. 宇宙的命运问题

有了广义相对论的引力场方程，爱因斯坦就要做一件有史以来气魄最大的事情：他要对整个宇宙求解。

在广义相对论的视角下，宇宙无非就是物质和时空。我们想象一片有很多山头的

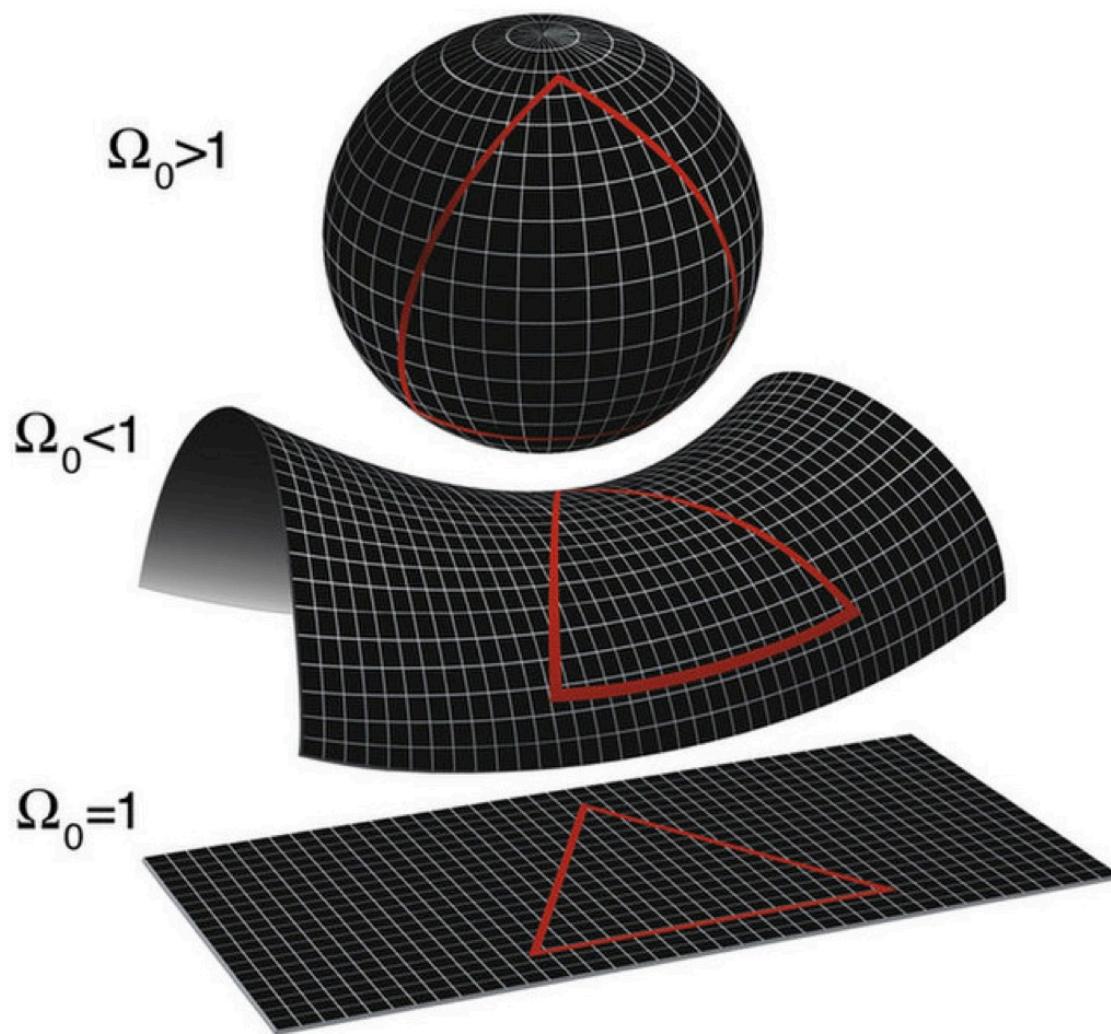
地方，这里突出一块，那里突出一块，每一座山代表大质量星球对时空地形的弯曲。那这么多星球放在这么广阔的时空中，它们在整体上会有一个什么样的行为呢？

答案取决于这个宇宙中物质密度的大小。引力场方程解出来的宇宙大尺度时空，可以有三种解。

如果宇宙中的物质比较密，那引力场就会比较强，整个大尺度时空的形状就会是蜷缩着的，用数学语言来说就是曲率是正的，好像一个球面。

如果物质密度比较小，那引力场就会比较弱，时空的形状就是伸展开的，曲率为负，好像是个马鞍形。

如果物质的密度不大不小，时空的形状就是在大尺度上是平直的，曲率正好等于0。下面这张图，表现了这三个解的时空形状——



图中 Ω_0 代表宇宙中物质的密度。图片来自 space.com

但是这三个解都有大问题。如果宇宙的曲率是正的，时空就会不断收缩；如果曲率是负的或者是0，时空就会不断膨胀——不管怎么说，引力场方程结出来的宇宙时空都不会是静态的。

这完全违背了当时人们的宇宙观。人们认为人可以有生有死、地球和太阳都可以

毁灭，但*宇宙本身*，应该是永恒不变的。

这一次，爱因斯坦手软了。

爱因斯坦干了一件不符合自己风格的事。他为了让结果符合传统的观念，修改了自己的理论。爱因斯坦给引力场方程增加了一项。你可以看一眼，就是带有红色希腊字母 Λ 的那一项。

$$\left(R_\alpha{}^\beta - \frac{1}{2} g_\alpha{}^\beta R \right) + \textcolor{red}{\Lambda} g_\alpha{}^\beta = \frac{8\pi G}{c^4} T_\alpha{}^\beta$$

爱因斯坦把 Λ 称为「宇宙常数」。他也不知道宇宙常数有什么物理意义，这一项的存在只是为了提供一个静态的宇宙解。好在就算多了这一项，广义相对论在任何局部的计算结果还是一样的。

然而十几年之后，天文学家哈勃系统性地观测远方的星体，发现这些星体发出的光谱都有一个红移——也就是说，远方的星星都在离我们而去！

对此只有一个解释，那就是宇宙正在膨胀。宇宙真不是静态的！

爱因斯坦后悔不已。他原本有机会提前算出来宇宙在膨胀。可是他手软了，没敢坚持做自己！爱因斯坦说，这是他一生最大的错误。

可坚持就一定是对的吗？

2. 量子力学和统一理论

在广义相对论带来宇宙学革命的同时，物理学的另一个阵地正在展开一场同样重大、同样震撼、甚至可能更加不可思议的革命，那就是量子力学。

其实爱因斯坦还是量子力学的开创者。是爱因斯坦第一个提出光并不是像水流一样连续流动的，而是一小份一小份的「光子」——爱因斯坦也正是因为这个学说获得诺贝尔奖，这也是人们第一次知道「量子」这个概念。

所谓「量子」，就是不连续变化的、一小份一小份的东西。物理学家玻尔一开始完全不能接受「量子」这个概念，光怎么可能不连续流动呢？但是后来玻尔接受了，而且成了量子理论最坚定的传道者。

玻尔进一步提出，原子中电子的轨道也是「量子」的——电子只能从一个轨道*突然*跳跃到另一个轨道，而不经过什么「中间地带」。

这一次，轮到爱因斯坦不能接受。爱因斯坦无法相信有什么东西能在时空中跳跃。

是，相对论认为时空的尺寸可以是相对的，时空的形状可以是弯曲的，可是毕竟你得尊重时空本身的存在。你不能说一个东西本来在这里，突然又出现在那里！

但是量子力学的革命仍然在继续。物理学家又发现，一个粒子可以同时穿过两个缝隙，可以既在这里、又在那里——现在连「位置」和「速度」这些最基本的东西都靠不住了。

爱因斯坦拒绝接受。

量子力学还说，世界上有些事儿是完全随机发生的，物理学再精确，也不可能对它做出预言——在量子力学的世界里没有确定性，我们只能谈概率……

爱因斯坦已经忍无可忍，他说「上帝不会掷骰子！」

你大概听说过「索尔维会议」，这是当时世界上最厉害的物理学家的集会，召开过很多次。就在这些索尔维会议上，爱因斯坦跟支持量子力学的物理学家展开了一次又一次的论战。有时候爱因斯坦白天提出一个思想实验证明量子力学的结论不对，玻尔会苦思一晚上，第二天指出爱因斯坦推理的漏洞。

.....

物理学的历史最终站在了量子力学一边。到 1930 年代，几乎所有主流物理学家都接受了量子力学——正如他们都接受了广义相对论。爱因斯坦陷入了孤立。

可是广义相对论和量子力学存在根本的矛盾。广义相对论认为时空是连续的，只要选定了坐标系，位置和速度就都是唯一的，广义相对论认为物理定律完全可以计算一切运动——而量子力学正好相反。

物理学再次陷入危机。或者，只有爱因斯坦觉得那是一个危机。毕竟广义相对论是大尺度的理论，而量子力学研究的是微观的世界。别的物理学家都认为这个矛盾可以先放着，目前是井水不犯河水……

可是爱因斯坦如果能坐视这个矛盾，他就不是爱因斯坦了。他多么希望自己能再一次看破红尘，再一次开拓疆域，得到一个统一理论，告诉世人宏观和微观其实是一回事儿……

一直到 1955 年离世，他也未能做到。

3. 英雄

我以前读过一个科幻小说，说爱因斯坦晚年其实已经发现了统一理论，但是因为这个理论能带来不可思议的力量，他决定对世人保密，只告诉了自己的四个学生。后来多方势力争夺爱因斯坦的统一理论，导致四个学生全部被杀。

可惜那只是小说家对爱因斯坦的美好祝愿。

事实是爱因斯坦不可能得到统一理论，粒子物理学在爱因斯坦去世之后取得突飞猛进的发展。1970 年代，物理学家把电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用这三个除了引力之外的自然界基本力给统一起来了。爱因斯坦活着的时候还没有这些知识，他还知道那些微观世界的实验结果。

爱因斯坦在 1933 年定居美国，担任普林斯顿高等研究院的教授。他脱离了物理学研究的主流，把所有立功的机会都让给别人，自己坚持去做那个不可能完成的任务。

他逐渐变得离群索居，跟同事和家人都慢慢疏远。好在后来普林斯顿来了个年轻的逻辑学家，库尔特·哥德尔——就是「哥德尔不完备性定理」的那个哥德尔，跟爱因斯坦成了忘年交。

爱因斯坦说他每天之所以还去高等研究院上班，就是为了拥有跟哥德尔一起上下班的荣幸。两人在上下班的路上谈论物理、哲学和政治。爱因斯坦能跟哥德尔聊到一起去，可能是因为哥德尔也相信宇宙是精密数学的产物，他同样鄙视量子力学。有同事回忆说，爱因斯坦和哥德尔这俩人只在一起聊，他们都不愿意跟我们聊。

有时候想想，爱因斯坦和牛顿大约是人类历史上最厉害的两个科学家，但是他们有个很大的区别。牛顿面对同时代的科学家非常傲慢，对谁都看不起，但是牛顿对大自然充满敬畏。牛顿说，我只不过是在海边玩耍的一个小孩子，偶尔发现了几个漂亮的贝壳，但是我背后，我没看到的，却是真理的汪洋大海。

爱因斯坦正好相反。爱因斯坦是个非常谦逊的人，从来不跟同辈的科学家争名夺利——但是爱因斯坦对大自然却充满了雄心壮志，他认为自己一个人就能发现终极真理！

七十六岁这一年，爱因斯坦因为腹主动脉瘤破裂引起内出血，被送到医院。这不是什么疑难杂症，医生建议马上手术。但是爱因斯坦拒绝了。爱因斯坦说「当我要离去的时候请让我离去，一味地延长生命是毫无意义的。我已经完成了我该做的。现在是该离去的时候了，我要优雅地离去。」

爱因斯坦去世后，哥德尔奉命整理他的办公室。哥德尔看到黑板墙上写着几个公式。

那些公式不会得到任何东西，是个死胡同。

相对论 13～万维刚

相对中的绝对

如是我闻。一时我佛爱因斯坦在普林斯顿。为哥德尔讲相对论。

哥德尔从引力场方程中发现了一个不同于前人的、关于整个宇宙的解。根据这个解，宇宙的时空是旋转的——每个人抬头看漫天的星斗都在绕着自己转，而且如果一个人能沿着一个方向走足够长的路程……他不但能回到自己出发的*位置*，而且能回到自己出发的*时刻*。

哥德尔算出来一个在时间上循环的宇宙。这个解不一定违反因果关系——循环不等于穿越，可能你还是改变不了历史——但是如果所谓的「过去」还可以再次发生，那它还是过去吗？如果时间能循环，那时间还是时间吗？

爱因斯坦不喜欢这个解，事实上我们这个宇宙的观测证据也不支持这个解。但是哥德尔有一个洞见。

哥德尔说，我们的宇宙是不是这样的不重要。重要的在于有一个宇宙可以是这样的。而既然相对论的一个合法的解里，时间流逝是一个幻觉，那就说明，在所有的宇宙中，时间流逝都是幻觉。

相对论咱们已经讲完了，这一讲说说我们能从相对论中得到什么。比如说，哥德尔说的，其实是客观实在应该与视角无关。

1. 一切都是相对的吗？

时间可以膨胀，长度可以收缩，时空可以弯曲，你同时不一定是我同时。被相对论颠覆了这么多次，人可能会陷入一种虚无主义。

还有什么概念是不会被颠覆的？也许世界上的一切都是相对的。也许我唯一知道的就是我一无所知……

千万别这样。这和有些女孩失恋几次之后就说「男人没一个好东西」是一样的，这是气话。我们学习科学不是为了证明自己一无所知，你得知道自己知道。

相对论可不是说一切都是相对的，它只是说*坐标系*是相对的。坐标系，你可以把它理解成「视角」。

物理学家泰勒（Edwin F. Taylor）和惠勒（John Archibald Wheeler）打过这么一个比方。现在有个小镇，请了两位绘图员来绘制小镇的地图。

第一个绘图员用指南针确定方向，以罗盘上的北方为北方，画了一张地图。

第二个绘图员则是用北极星所在的方向为北方，也画了一张地图。

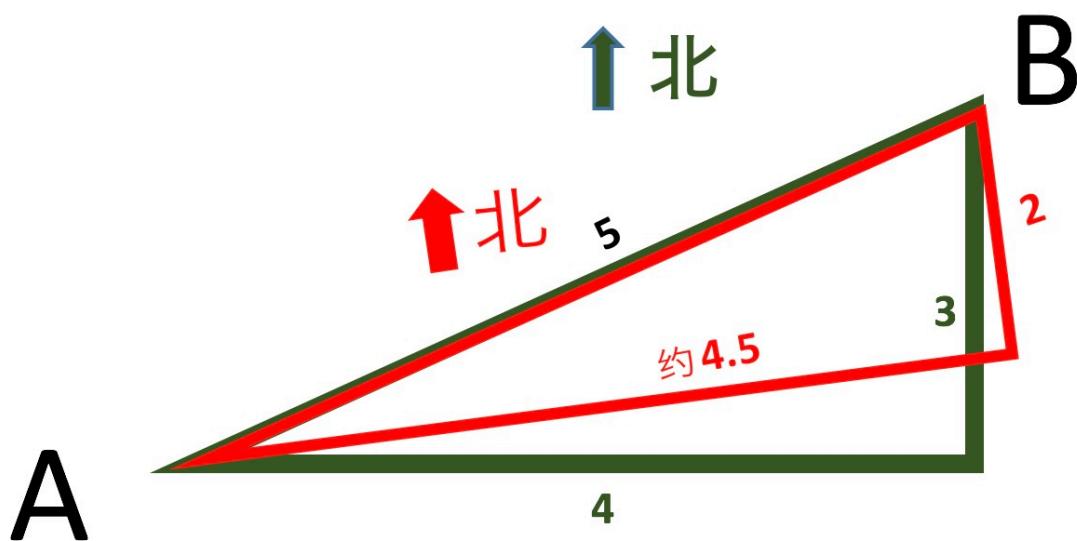
地球磁极和北极星的方向并不一致，我们可以想象，这两张地图肯定不一样，互相交流比较麻烦。

比如小镇中有个 A 点代表你家，B 点代表你要去的一个商店。第一张地图上说，B 点在 A 点往东 4 公里、再往北 3 公里的地方。而在第二张地图上，B 点是在 A 点往东大约 4.5 公里、往北 2 公里的地方。B 点和 A 点的方位关系，显然是*相对*的。

但是，如果你要问从 A 点到 B 点的直线距离有多长，那不管你用的是哪张地图，答案都是 5 公里。

这个距离是一个*绝对*的事实。不管地图的北方在哪儿，只要你没画错，图上两点之间的距离都是绝对的。

绘图员选择自己的北方，就选择了坐标系。而坐标系只是各人不同的视角。客观实在是客观实在。



2. 不变量

当然在相对论中连距离都不是绝对的，长短取决于你的坐标系和这段距离之间的相对速度。但是，相对论里也有一些东西跟坐标系无关，是绝对的。

比如说「事件」就是绝对的。大家可以对位置和时间有不同的看法，但是事件就

是事件。一束光发出来了，哥哥和妹妹见面，不管在哪个坐标系看都是同样的事件。

爱因斯坦在苏黎世联邦理工学院上大学的时候，物理系有个教授叫闵可夫斯基，曾经教过爱因斯坦数学。可能爱因斯坦那时候对闵可夫斯基没什么深刻印象，但是后来闵可夫斯基主动学习了相对论，而且弄出来一套数学工具，能把相对论的计算变得既简单又美观。

闵可夫斯基弄的这个东西叫「四维矢量」。四维矢量可以让物理量在四维时空中协同变换。把时间当做一维，空间三维，时空的四维矢量就是 (ct, x, y, z) 。

不管是什坐标系，在时空中的两个事件，A 和 B，假设它们的时间间隔是 t ，空间三个维度的间隔分别是 x, y, z ，那么闵可夫斯基规定，它们的时空间隔是：

$$d^2 = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2.$$

这个距离是一个绝对的不变量。不管你用的是什坐标系， d^2 的数值都是一样的。

坐标系是各人的视角，不变量，揭示了客观实在。

如果 $d^2 > 0$ ，我们就说 A 和 B 之间是一个「类时」间隔——也就是时间意义上的间隔。这就意味着两个事件总是一个先发生，一个后发生，它们在各自的光锥之内，它们之间可以有因果关系。

如果 $d^2 < 0$ ，这就是一个「类空」间隔，那就说明两个事件空间距离太远，不可能存在因果关系。它们不在各自的光锥之内，谁先发生谁后发生是相对的。

还有一个「类光」间隔，也就是 $d^2 = 0$ ，说明光正好可以从事件 A 走到事件 B。

因果关系是个不变量。不变量是相对中的绝对。

其实爱因斯坦一度想把相对论叫做「不变论」，因为理论的出发点就是光速不变。现在我们还知道时空间隔是不变的。还有静止质量也是不变的——能量和动量都和坐标系有关，但是如果你把能量和动量放在一起形成四维矢量，静止质量就是这个四维矢量的不变量。还有电荷与电流，静电势能和矢量势能，其中都蕴含着不变量。

物理学研究的东西，叫做「客观实在」。你得首先承认有客观实在才行。你不能说一切都是虚幻的。相对论改造了我们的时空观，但是你不能说时空都是幻觉。现在只是时空的含义变得更丰富了而已。

3. 相对论带给我们什么

物理学是最解放思想的学问，但也是一门仅次于数学的严谨学问。物理学教给我们的精神是既要激进地开放思想，又要激进地审视自己的观念。

咱们先说观念。你必须得学会区分，哪些观念是你自己视角下的一个印象，哪些是经过理性推导和观测验证的客观实在。

以前我们讲过一本书叫《为什么佛学是真的》，其中提到一个理解，到底什么叫「色即是空」。佛学说的色即是空，意思很可能不是说世间万事万物都是空的——空的不是东西^{*本身*}，而是你赋予这个东西的^{*内涵*}，也就是你自己的印象。

比如这有一朵塑料花，如果你知道这朵花曾经被哪个名人戴过，它有什么故事，你就会赋予这朵花一个特殊的内涵，你觉得它特别珍贵。这个内涵就是相对的，是你主观视角下的主观看法。

换个坐标系，哪怕请专家对这朵花做技术鉴定，他也不会觉得这朵花有什么特别之处。他可能还觉得这花并不怎么好看。

爱因斯坦说，如果引力是真实的存在，怎么可能在一个坐标系下有，在另一个坐标系下就没有呢？我们可以说引力是个幻觉，也可以说每个人赋予这朵花的内涵都是空的。

这朵花的存在是绝对的，但是人们对花的印象是相对的。

我们讲相对论的时候总爱问一句话：这是相对于谁的？借鉴到这一点，当你产生一种强烈观点的时候，你也应该提醒自己，这是相对于我的。

比如说怎样用相对论观看一场足球赛。裁判判罚我方球员犯规，你可能觉得裁判这次判罚不公平，可是对方球迷却可能认为裁判就只有这次判罚才公平。

当你宣称我方球员怎么犯规都是为了国家的胜利，国际比赛就不用讲规矩的时候，你能不能保留一点钻研相对论的习惯，问问如果是在对方的坐标系下，这些行为应该怎么算。

当你宣称大家都是各为其主、这个世界上根本就没有绝对的对错的时候，你能不能想想相对论里的那些不变量，最起码统计一下双方各自的犯规次数。

相对论总是提醒我们思想的局限性。亚里士多德认为静止是最自然的运动状态，牛顿认为匀速直线运动也是最自然的状态，而爱因斯坦说沿着测地线的任何运动都是最自然的状态。

我们难以接受相对论的结论，是因为我们从来都是生活在一个低速的环境之中。那我们能不能举一反三，看看还有什么思想，是自身环境的产物。

你在乡村获得的经验，能适用于大城市吗？你在历史上获得的经验，能够适用于现在吗？

相对论打开了一扇大门。是爱因斯坦让世人深刻地意识到，现实可以和日常生活有如此巨大的差异。

自从有了相对论，物理学就从「反对日常直觉」，变成了「日常反直觉」。

哥德尔说时间的流逝是个幻觉，爱因斯坦并没有赞同，这个论断只能留待科学检验。但是爱因斯坦更反对量子力学，而量子力学现在已经是物理学家的常识。

也许只有到了连爱因斯坦都反对你的时候，你才算是学会了做爱因斯坦。

相对论还带给我们乐观的情绪。也许现在有一个边远地区的孩子，从来没进过城。他考上了大学，要去北京。他可能知道、也可能不知道，北京的生活和他家乡完全不一样。他将来还会去世界各个地方，他会发现这个世界完全超出他的想象。

这个孩子会不会感到害怕？如果你学了相对论，我希望你告诉他别害怕。

这个世界跟我想的非常不一样，我们的很多观念都错了，但是正像是相对论展示给我们的那样，这个世界只比你想象的精彩和丰富得多，也会好得多——只要你

愿意克服自己的偏见和无知。

爱因斯坦说，「上帝是不可捉摸的，但并无恶意。」

假如未来发生什么大灾变

让世界重归黑暗

人们不再钻研科学

拜倒在虚幻的神和压迫的权力之下

被偏见和狂热蒙蔽

只看到眼前的计较和平庸的善恶

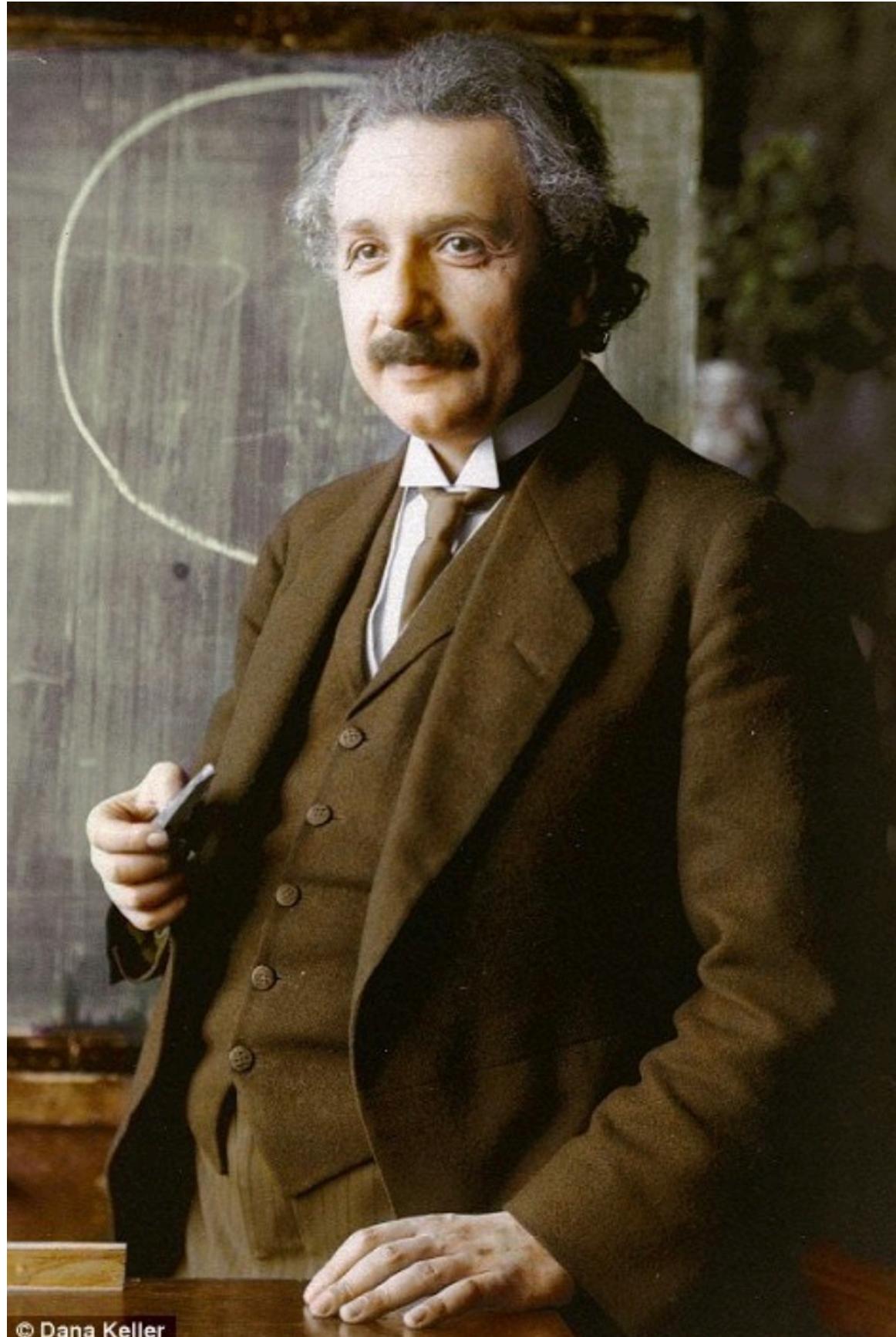
我希望至少你、我

我们这几个人还记得

这个世界曾经拥有过爱因斯坦

拥有过相对论

这个美丽的理论



© Dana Keller