

《量子纠缠如何成为一种强大的工具》

2022 年诺贝尔物理学奖解读——基于领域模型

作者：焜涛，火龙果软件工程

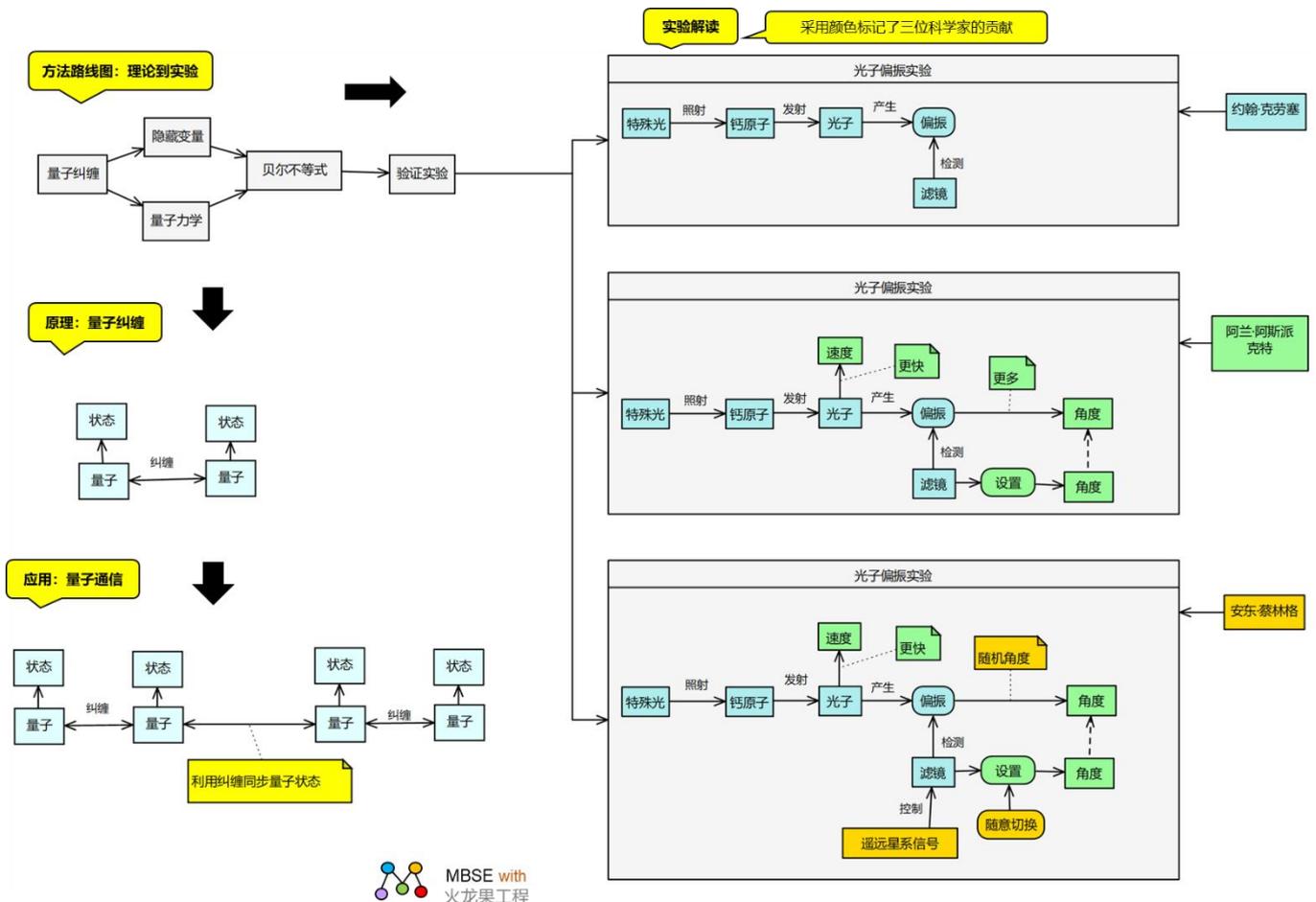
昨天瑞典皇家科学院公布了 2022 年诺贝尔物理学奖，获奖者是关于量子力学的贝尔不等式的验证实验的贡献者。到诺贝尔官方网站看看了新闻原稿，介绍了获奖的科学家、获奖原因，还附有获奖研究的科普介绍《纠缠如何成为一种强大的工具》。读了感觉很有收获：

- 了解了：量子纠缠怎么回事，和量子计算机、量子通信什么关系。
- 更重要的是：感受了一个科研的真实的过程。

《纠缠如何成为一种强大的工具》写的很好，浅显易懂，我们关注诺奖，要是少些功利，多些对科学的求知和热爱就好了。读完文章后，觉得这么好的文章，应该用我擅长的逻辑建模整理一下，2 个目的：

- 让自己理解更正确、透彻。
- 方便大家了解这篇文章传递的知识。

想到这，立刻动手，采用 UML 类图，用领域建模方法，建立了一个概念模型，如下：



图起到整理知识脉络的作用，还需要文字解读一下：

基础知识：

1. 量子纠缠是一种量子之间的作用现象，2 个量子之间有纠缠作用，一个粒子发生的状态变化造成了另一个量子的状态变化，即使他们距离很远。
2. 有 2 种解释方法：
 - 量子力学，一套有关量子之间作用力的完整理论。
 - 隐藏变量，这是爱因斯坦的观点，认为有未经观察到的隐藏变量，引起了量子纠缠。
3. 贝尔不等式：如果具有隐藏变量，则贝尔不等式必然小于等于某个值。
4. 能够验证贝尔不等式的实验，就成为验证隐藏变量是否存在的科学依据。反之，则可以证明量子力学的解释是对的。

如下进入 2022 年诺贝尔物理学奖的贡献视图：

5. 约翰·克劳瑟(John Clauser) 1960 年代：建立了《光子偏振实验》：使用特殊光照射钙原子，钙原子发射纠缠的光子，光子产生偏振，使用滤镜检测光子的偏振。测量的结果证明违反了贝尔不等式，开启了否定隐藏变量存在的方法。
6. 阿兰·阿斯派克特 (Alain Aspect) 1972 年：进一步开发了实验，使用了一种激发原子的新方法，发射更高的速率的纠缠的光子，可以根据光子的偏振角度切换滤镜的设置，这样就可以去掉影响因素。
7. 安东·蔡林格(Anton Zeilinger)：进一步改进了实验，通过将激光照射在一种特殊的晶体上，创造出纠缠光子对，并可以随机切换滤镜的角度，以便来测量各种角度的光子的偏振。为了消除影响因素，使用来自遥远星系的信号来控制滤镜，并确保信号不会相互影响。

如下进入 诺奖的应用价值视图：

8. 因为量子纠缠可以实现超距的一个量子纠缠对中的 2 个量子的状态同步，这样就可以极大拓展通信的距离。Anton Zeilinger 的研究小组在 1998 年首次演示了这种纠缠交换。

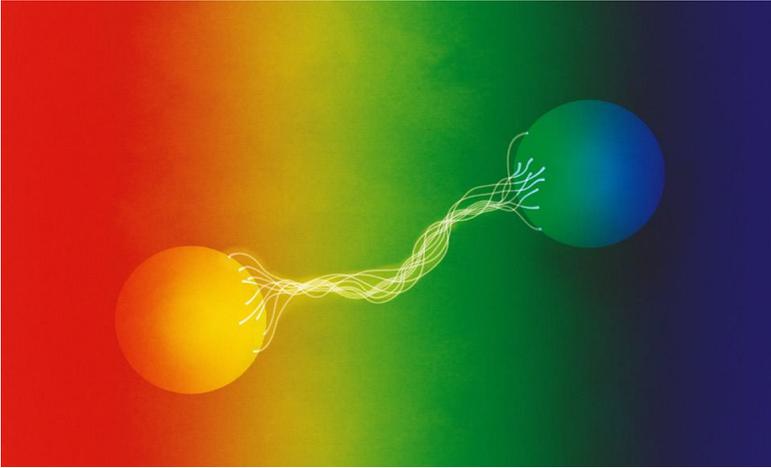
《译文：纠缠如何成为一种强大的工具》

译者：俎涛

出处：诺贝尔物理学委员会官网

<https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/popular-physicsprize2022.pdf>

通过开创性的实验，Alain Aspect, John Clauser 和 Anton Zeilinger 已经证明了研究和控制处于纠缠态的粒子的潜力。纠缠对中，一个粒子发生的情况决定了另一个粒子发生的情况，即使它们真的相距太远，无法相互影响。获奖者开发的实验工具为量子技术的新时代奠定了基础。



量子力学的基础不仅仅是一个理论或哲学问题。大量研究和开发正在进行中，目标是利用单个粒子系统的特殊性质来构建量子计算机、改进测量、建立量子网络和建立安全的量子加密通信。

许多应用依赖于量子力学如何允许两个或多个粒子以共享状态存在，而不管它们相距多远。这被称为纠缠，自从量子力学理论形成以来，它一直是量子力学中争议最大的元素之一。阿尔伯特·爱因斯坦称其为幽灵般的超距作用，Erwin Schrödinger 则说这是量子力学最重要的特征。

今年的获奖者探索了这些纠缠量子态，他们的实验为目前正在进行的量子技术革命奠定了基础。

与日常经验相距甚远

当两个粒子处于纠缠量子态时，测量一个粒子属性的人可以立即确定对另一个粒子进行等效测量的结果，而不需要检查。

乍一看，这可能并不奇怪。如果我们考虑球而不是粒子，我们可以想象一个实验，一个黑球向一个方向发送，一个白球向相反的方向发送。一个观察者接住了一个球，看到它是白色的，他可以立即说向另一个方向移动的球是黑色的。

量子力学的特别之处在于，它和球的等价物在被测量之前没有确定的状态。就好像两个球都是灰色的，直到有人看到其中一个。然后，它可以随机地取这两个球所能取到的所有黑色，也可以显示自己为白色。另一个球立即变成相反的颜色。

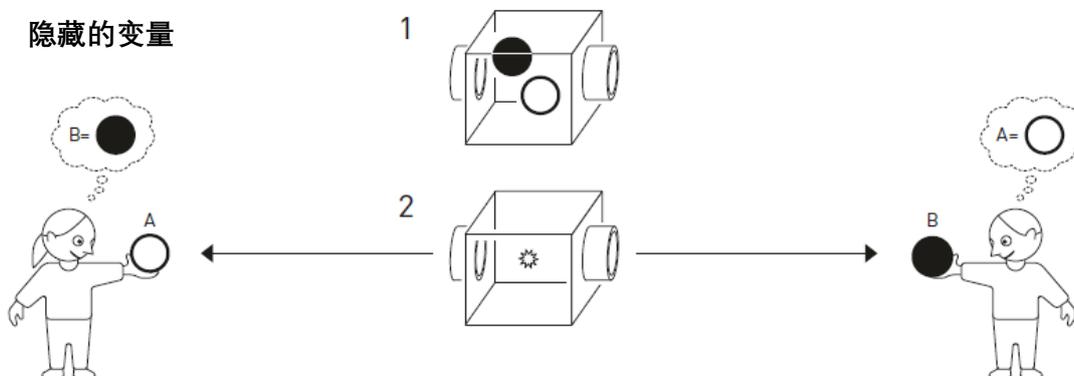
但是，怎么可能知道每个球在开始时不是都有固定的颜色呢？即使它们看起来是灰色的，也许它们里面有一个隐藏的标签，说明当有人看到它们时应该变成什么颜色。

没有人看的时候，颜色存在吗？

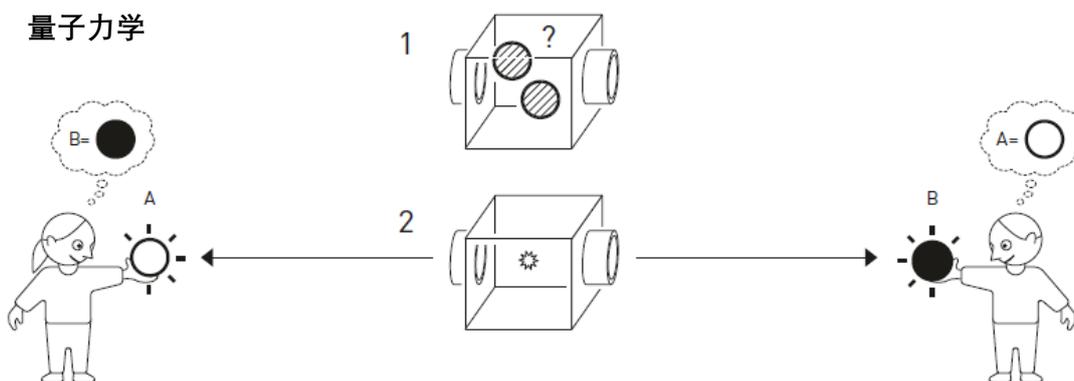
量子力学的纠缠对可以比作一台向相反方向扔出相反颜色的球的机器。当鲍勃接住一个球并看到它是黑色的，他立即知道爱丽丝接住了一个白色的球。在使用隐藏变量的理论中，球总是包含显示什么颜色的隐藏

信息。然而，量子力学说，这些球是灰色的，直到有人看到它们，其中一个随机变成白色，另一个变成黑色。贝尔不等式表明，有一些实验可以区分这两种情况。这样的实验证明了量子力学的描述是正确的。

隐藏的变量



量子力学



获得今年诺贝尔物理学奖的研究的一个重要部分是一个被称为贝尔不等式的理论见解。贝尔不等式使得区分子力学的不确定性和另一种使用秘密指令或隐藏变量的描述成为可能。

实验表明，自然界的行与量子力学的预测一致。球是灰色的，没有秘密信息，在实验中，随机决定哪个变成黑色，哪个变成白色。

量子力学最重要的资源

纠缠量子态具有存储、传输和处理信息的新方法的潜力。

如果纠缠对中的粒子向相反的方向运动，其中一个粒子遇到第三个粒子，就会发生有趣的事情。然后它们进入一个新的共享状态。第三个粒子失去了它的身份，但它原来的属性现在已经从原来的一对粒子转移到单独的粒子。这种将未知量子态从一个粒子转移到另一个粒子的方式称为量子隐形传态。Anton Zeilinger和他的同事在 1997 年首次进行了这种类型的实验。

值得一提的是，量子隐形传态是将量子信息从一个系统传输到另一个系统而不丢失任何部分的唯一方法。要测量量子系统的所有属性，然后将信息发送给想要重建系统的接收方，这是绝对不可能的。这是因为量

子系统可以同时包含每种属性的多个版本，其中每个版本在测量期间都有一定的出现概率。一旦测量完成，只剩下一个版本，即测量仪器读取的版本。其他人都消失了，根本不可能了解他们的任何情况。然而，利用量子远距离传态可以转移完全未知的量子属性，并在另一个粒子中完好无损地出现，但代价是它们在原始粒子中被破坏。

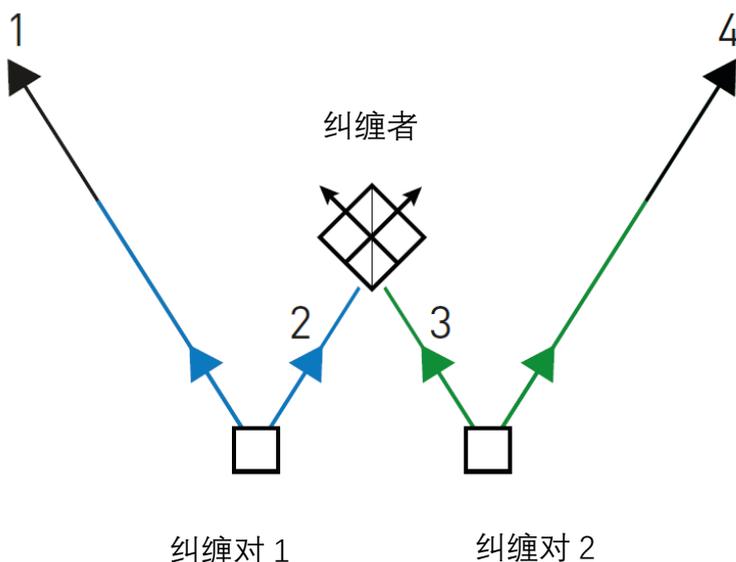
一旦实验证明了这一点，下一步就是使用两对纠缠粒子。

如果每一对中的一个粒子以特定的方式聚集在一起，则每一对中未受干扰的粒子可能变得纠缠，尽管它们从未相互接触过。Anton Zeilinger 的研究小组在 1998 年首次演示了这种纠缠交换。

纠缠的光子对，即光的粒子，可以通过光纤向相反的方向发送，并在量子网络中作为信号发挥作用。两对之间的纠缠使得在这样的网络中拓展节点之间的距离成为可能。在光子被吸收或失去其特性之前，通过光纤传输的距离是有限的。普通的光信号可以在这一过程中被放大，但这对于纠缠对不起作用。放大器必须捕获和测量打破纠缠的光。然而，纠缠交换意味着可以将原始状态发送得更远，从而将其传输到比原来更远的距离上。

从未相遇的纠缠粒子

两对纠缠粒子从不同的来源发射。每一对中的一个粒子以一种特殊的方式聚集在一起，使它们纠缠在一起。这两个其他粒子(图中的 1 和 4)也被纠缠。通过这种方式，两个从未接触过的粒子可以纠缠在一起。



从悖论到不等式

这一进步有赖于多年的发展。它始于一个令人难以置信的洞见:量子力学允许单个量子系统被分成多个相互分离的部分，但仍然作为一个单一的单元。

这违背了所有关于因果关系和现实本质的通常观念。依据常识，我们不相信会有这样的事情发生：某个地方发生了一件事，另一个地方被这个事件所影响，但是二个地方之间没有任何信号通信。信号的传播速度不能超过光速——但在量子力学中，似乎不需要信号来连接被扩展系统的不同部分。

阿尔伯特·爱因斯坦 (Albert Einstein) 认为这是不可行的，并与他的同事鲍里斯·波多尔斯基 (Boris Podolsky) 和内森·罗森 (Nathan Rosen) 一起研究了这一现象。他们在 1935 年提出了他们的推论：量子力学似乎没有提供对现实的完整描述。这被称为 EPR 悖论，以研究人员的姓氏命名。

问题是是否存在一种更完整的世界描述，量子力学只是其中的一部分。例如，这可以通过总是携带隐藏信息的粒子来工作，这些粒子将显示出实验结果。然后，所有的测量结果都会精确地显示出进行测量的地方存在的属性。这种信息通常称为局部隐藏变量 (local hidden variable)。

在欧洲粒子物理实验室 (CERN) 工作的北爱尔兰物理学家约翰·斯图尔特·贝尔 (John Stewart Bell, 1928-1990) 仔细研究了这个问题。他发现有一种实验可以确定世界是否纯粹是量子力学的，或者是否存在另一种带有隐藏变量的描述。在这个实验中，所有支持隐藏变量的理论都显示出结果之间的相关性，该相关性必须小于或最多等于某个特定值。这叫做贝尔不等式。

然而，量子力学可以违反这个不等式。它预测的结果之间的相关性比通过隐藏变量可能得到的值更高。如果贝尔不等式的验证实验能够被多次重复，则证明隐藏变量的理论是正确的，否则证明量子力学的理论是正确的。

约翰·克劳瑟 (John Clauser) 在 20 世纪 60 年代还是一名学生的时候就对量子力学的基础产生了兴趣。一旦他读到约翰·贝尔 (John Bell) 的想法，他就无法忘怀，最终，他和其他三位研究人员能够提出一项提案，用于测试贝尔不等式的现实类型的实验。

该实验包括向相反的方向发送一对纠缠粒子。在实践中，使用的是具有偏振特性的光子。当粒子被发射时，偏振的方向是不确定的，唯一确定的是粒子具有平行偏振。

这可以用一种滤光片来研究，这种滤光片允许在特定方向上进行偏振 (参见图 6)。这是许多太阳镜中使用的效果，它可以阻挡在某一平面上偏振的光，例如通过反射水。

如果实验中的两个粒子都被发送到同一平面上的滤波器，例如垂直方向，并且一个滑动通过-那么另一个也将通过。如果它们彼此成直角，其中一个将被停止，而另一个将通过。这个技巧是用不同方向的过滤器以偏斜的角度进行测量，因为结果可能不同：有时两个都能通过，有时只有一个，有时没有。两个粒子是否能够同时通过滤波器取决于两个滤波器之间的角度。

量子力学导致测量之间的相关性。一个粒子通过的可能性取决于在实验装置的另一边测试其同伴偏振的过滤器的角度。这意味着，在某些角度上，两个测量的结果违反了贝尔不等式，并且比由隐藏变量控制的结果具有更强的相关性，并且在粒子发射时已经预先确定。

违反了贝尔不等式

约翰·克劳瑟 (John Clauser) 立即开始着手进行这项实验。他建造了一个装置，一次发射两个纠缠光子，每个光子指向一个测试其偏振性的过滤器。1972 年，他与博士生斯图尔特·弗里德曼 (Stuart Freedman, 1944-

2012)一起展示了一个明显违反贝尔不等式的结果，并与量子力学的预测一致。

在接下来的几年里，约翰·克劳瑟和其他物理学家继续讨论这个实验及其局限性。其中一个问题是，实验的效率通常很低，无论是在产生粒子还是捕获粒子方面。测量也是预先设定的，滤波器的角度固定。因此存在漏洞，观察者可以质疑结果:如果实验装置以某种方式选择了碰巧具有强相关性的粒子，而没有检测到其他粒子，该怎么办?如果是这样的话，这些粒子可能仍然携带着隐藏的信息。

消除这个特殊的漏洞是困难的，因为纠缠在一起的量子态非常不牢固的，很难管理;有必要处理单个光子。法国博士生 **Alain Aspect** 并不害怕，他构建了一个新版本的设置，并经过多次迭代加以改进。在他的实验中，他可以记录通过滤光器的光子和没有通过滤光器的光子。这意味着更多的光子被探测到，测量结果也更好。

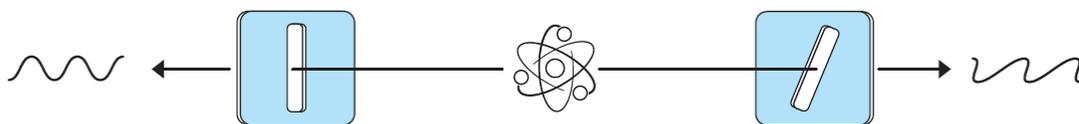
在他测试的最后一个版本中，他还能够将光子引导到两个不同角度的滤光片上。这个技巧是一种机制，它在光子被创造出来并从源发射出来后，改变了纠缠光子的方向。滤光器只有 6 米远，所以开关需要在十亿分之一秒内完成。如果关于光子到达哪个滤光器的信息影响了它从源发出的方式，那么光子就不会到达那个滤光器。在实验的一边，关于过滤器的信息也不能到达另一边，从而影响那里的测量结果。

通过这种方式，Alain Aspect 堵住了一个重要的漏洞，并提供了一个非常明确的结果:量子力学是正确的，没有隐藏的变量。

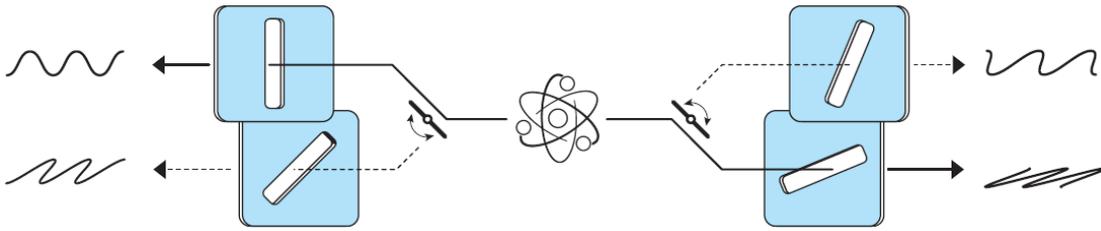
量子信息时代

这些以及类似的实验为当前量子信息科学的激烈研究奠定了基础。能够操纵和管理量子态及其所有属性层，使我们能够使用具有意想不到潜力的工具。这是量子计算、量子信息传输和存储以及量子加密算法的基础。**安东·泽林格(Anton Zeilinger)**和他的同事率先探索了两个以上粒子纠缠的系统，现在已经投入使用。

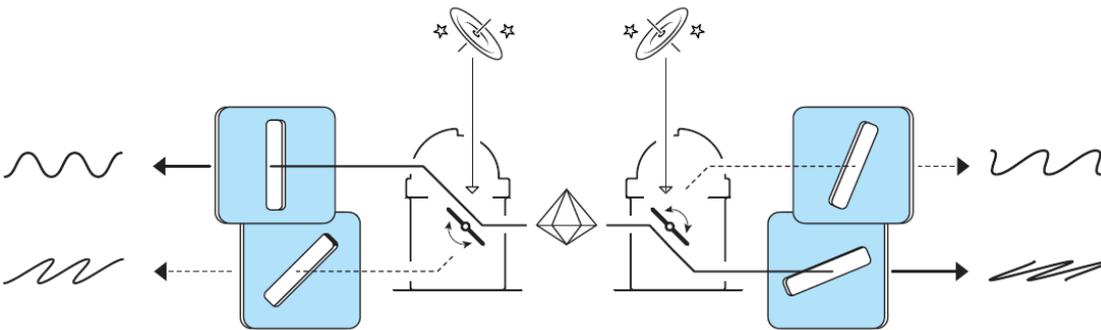
贝尔不等式的试验



约翰·克劳塞 (John Clauser) 使用了钙原子，在他用特殊的光照亮它们之后，钙原子可以发射纠缠的光子。他在两侧设置了一个滤光片来测量光子的偏振。经过一系列测量，他能够证明他们违反了贝尔不等式。



阿兰·阿斯派克特 (Alain Aspect) 进一步开发了 this 实验，使用了一种激发原子的新方法，使它们以更高的速率发射纠缠的光子。他还可以在不同的设置之间切换，因此系统不会包含任何可能影响结果的高级信息。



安东·蔡林格 (Anton Zeilinger) 后来对贝尔不等式做了更多的测试。他通过将激光照射在一种特殊的晶体上，创造出纠缠光子对，并使用随机数在测量设置之间切换。一项实验使用来自遥远星系的信号来控制滤波器，并确保信号不会相互影响。

这些日益完善的工具使现实的应用越来越近。纠缠量子态现在已经被证明存在于通过数十公里光纤发送的光子之间，以及卫星和地面空间站之间。在很短的时间内，世界各地的研究人员发现了许多新方法利用量子力学最强大特性。

第一次量子革命给我们带来了晶体管和激光，现在，由于有了操纵纠缠粒子系统的工具，我们正在进入一个新时代。

英文原文来源：

<https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/popular-physicsprize2022.pdf>

科学编辑: Ulf Danielsson, Thors Hans Hansson, Anders Irbäck, Mats Larsson,
诺贝尔物理学委员会

©瑞典皇家科学院

后记

希望您读了此文后有所受益。

如果您有经验乐于分享，欢迎投稿给我们，如果您对我们的培训、咨询和工具感兴趣，欢迎了解：

- 建模工具：[EA](#)
- 模型 web 浏览工具：[WebEA](#)
- MBSE 平台：[iSpace](#)
- 课程：[基于 SysML 和 EA 进行系统设计与建模](#)
- 课程：[基于 UML 和 EA 进行系统分析设计](#)
- 咨询方案：[MBSE\(基于模型的系统工程\)](#)
- 咨询方案：[基于 UML 的模型驱动的开发](#)
- 所有建模有关的课程：<http://www.modeler.org.cn/course/index.asp>
- 咨询方案：[基于模型的工程管理](#)

如果您希望了解更多信息：

- 欢迎访问建模者频道 <http://www.sysml.org.cn/>
- 也欢迎直接联系我们 zhgx@uml.net.cn ， 010-62670969



MBSE with 火龙果



火龙果软件 (EA 全球合作伙伴)
提供最专业建模方法与工具