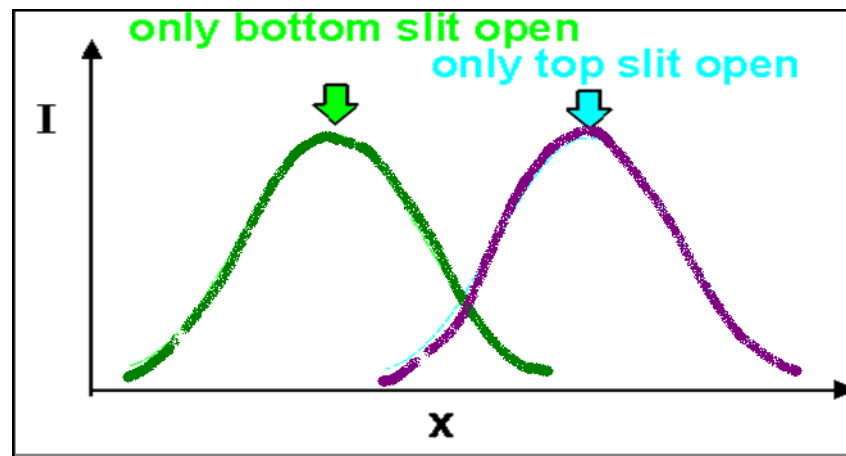
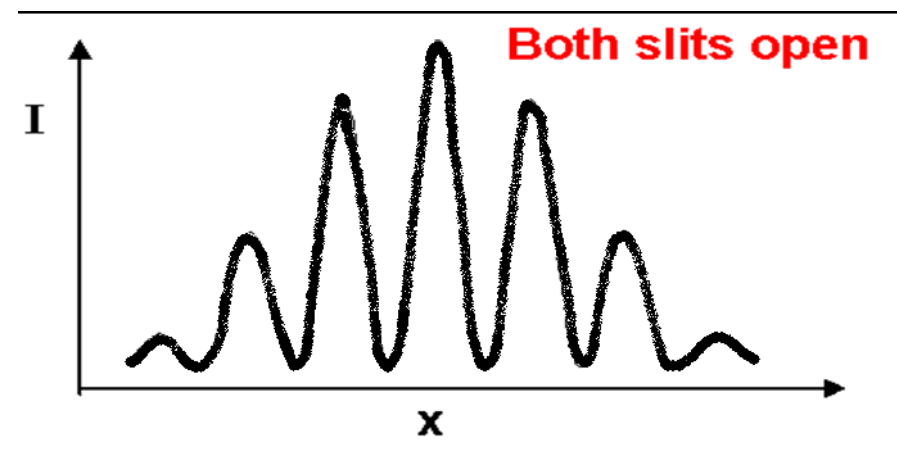
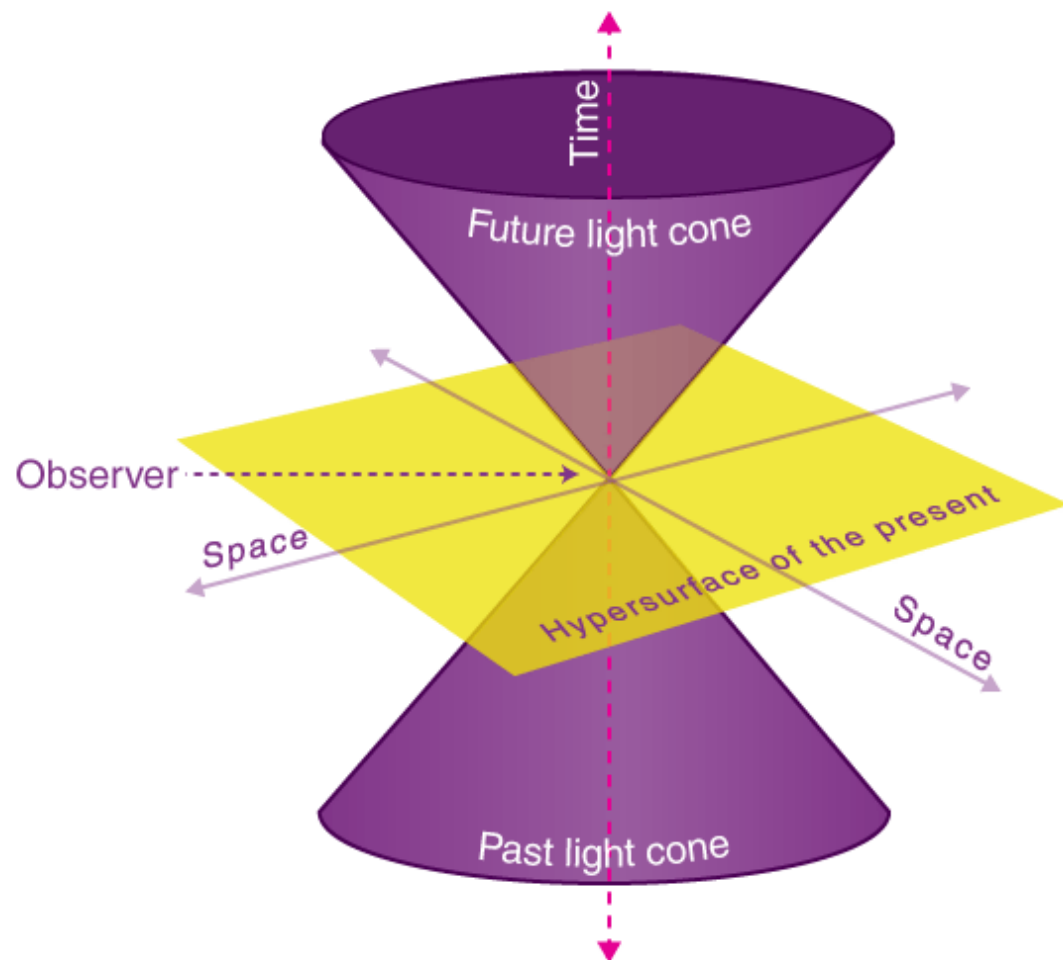
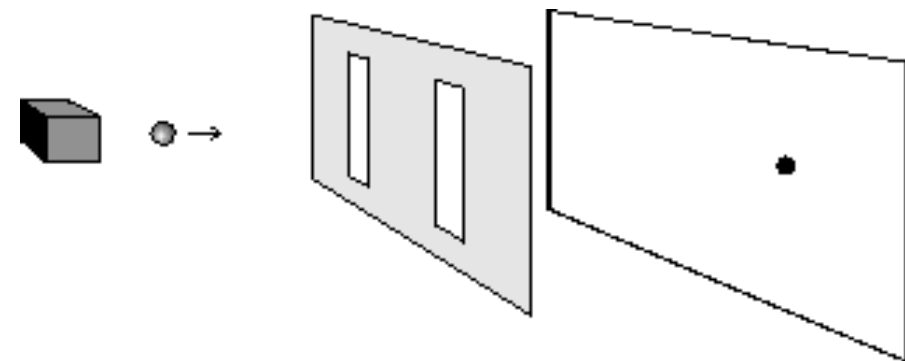
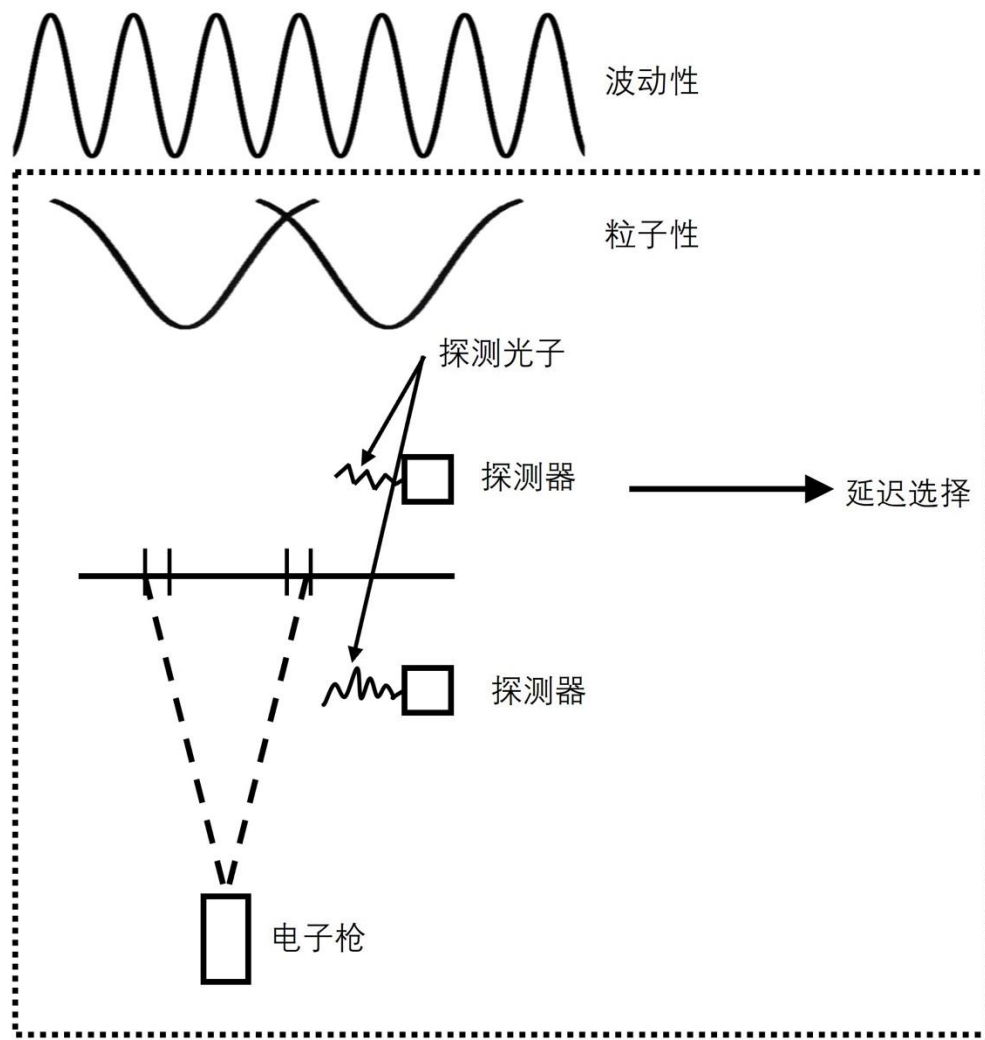
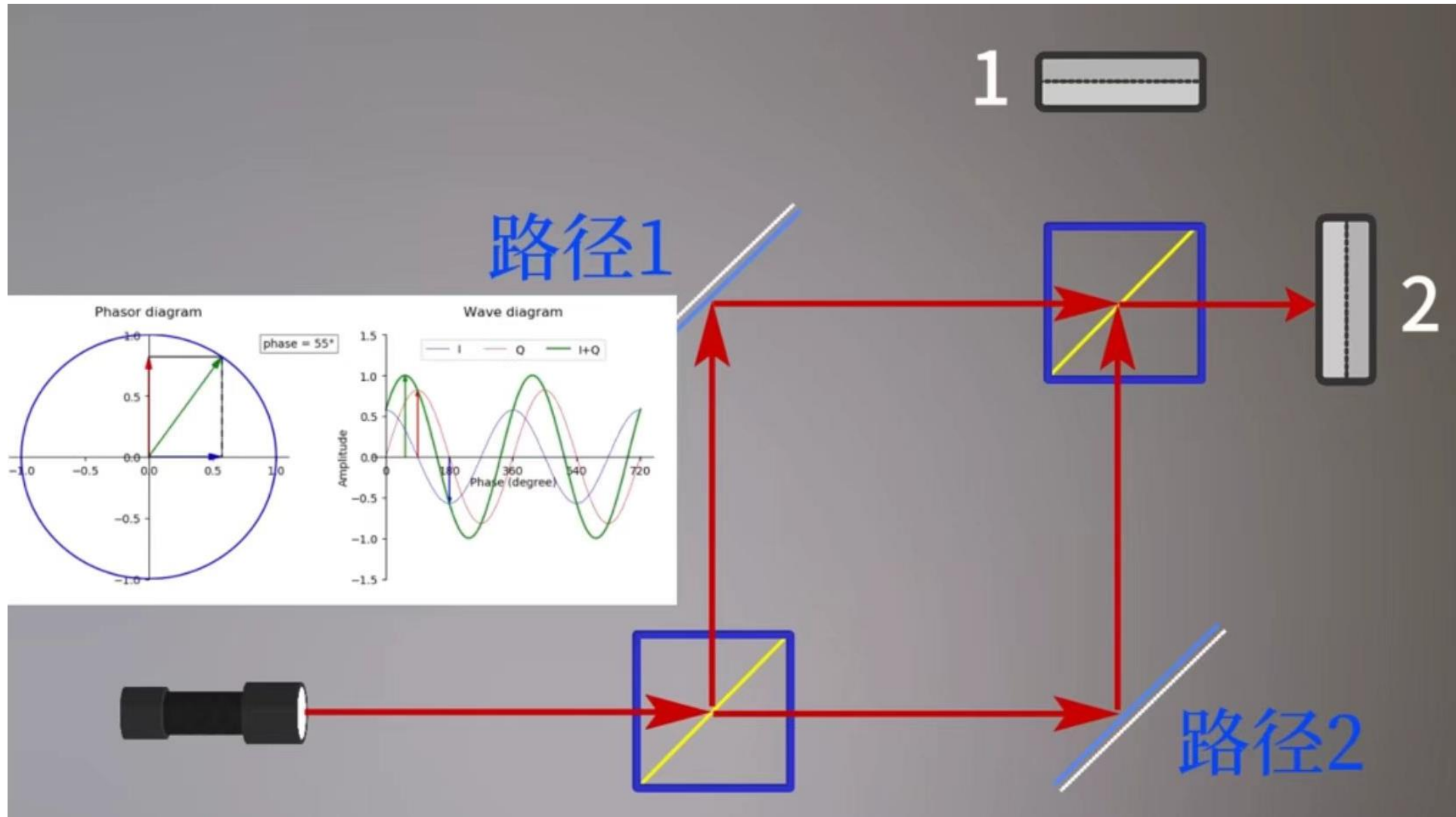


# 定域实在性：因果+客观



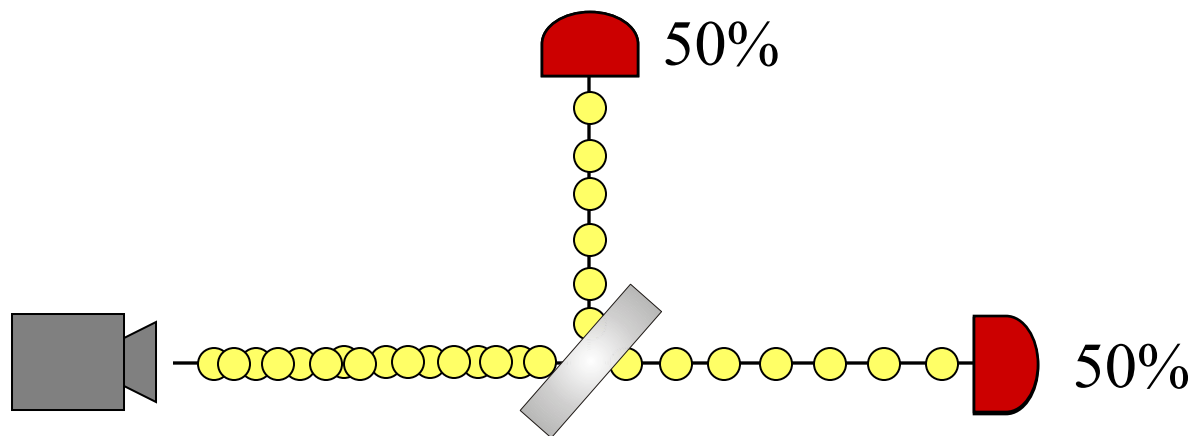


# Mach-Zehnder interferometer



# 延迟选择实验

粒子过：单光子穿过半透半反镜：



*Simplest explanation:* 半透镜随机把光子反射到两条路径上

波过：干涉增强或者干涉相消

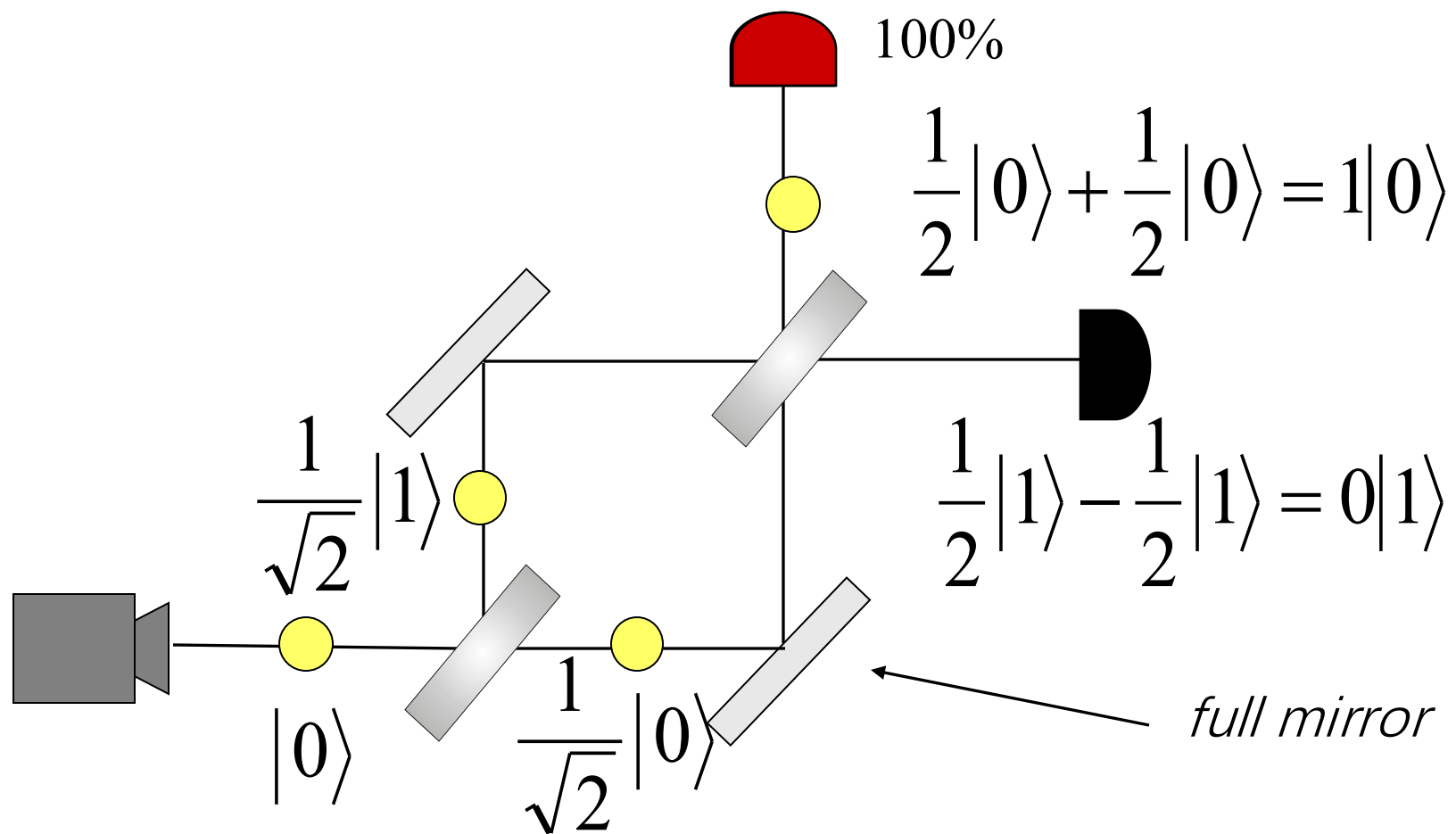


图1

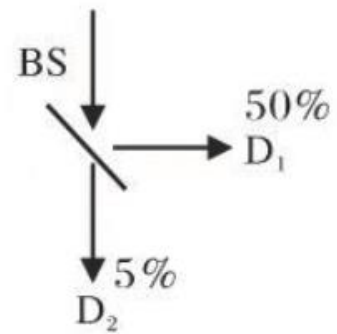


图2

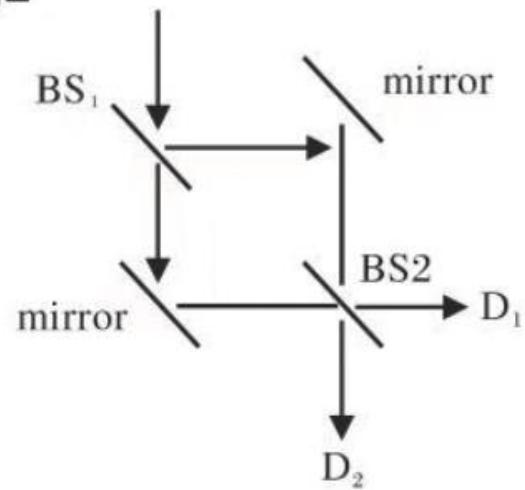
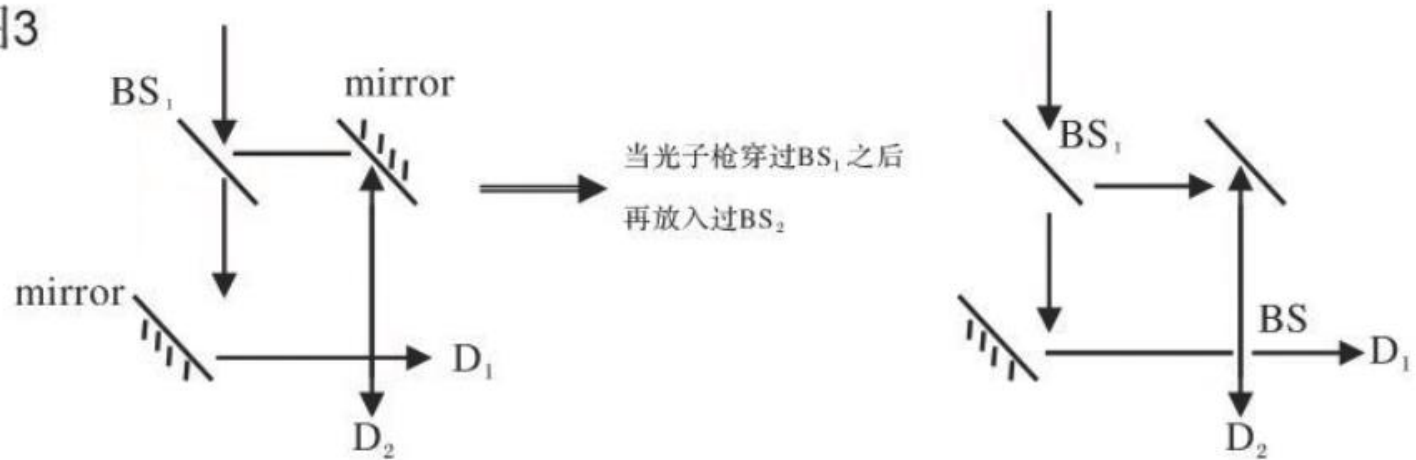


图3



# ❁ 后选择实验

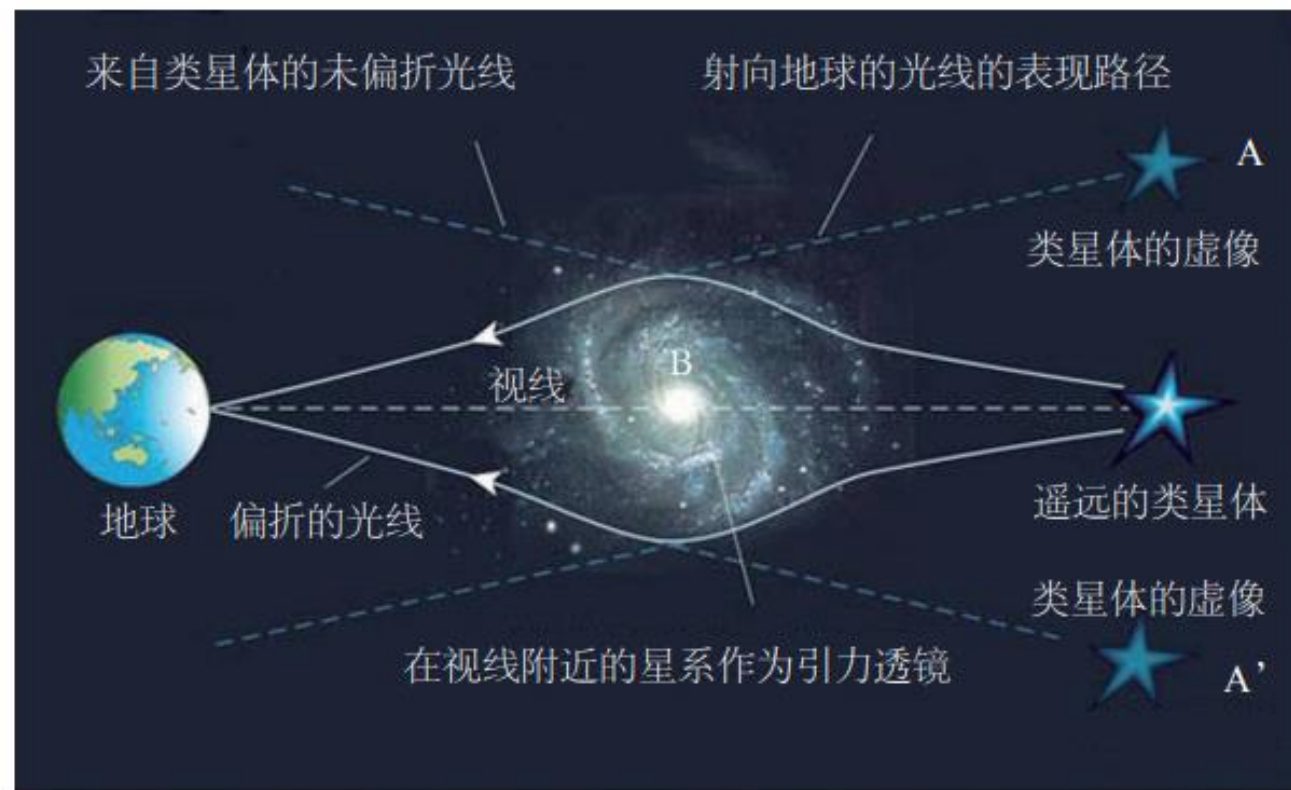
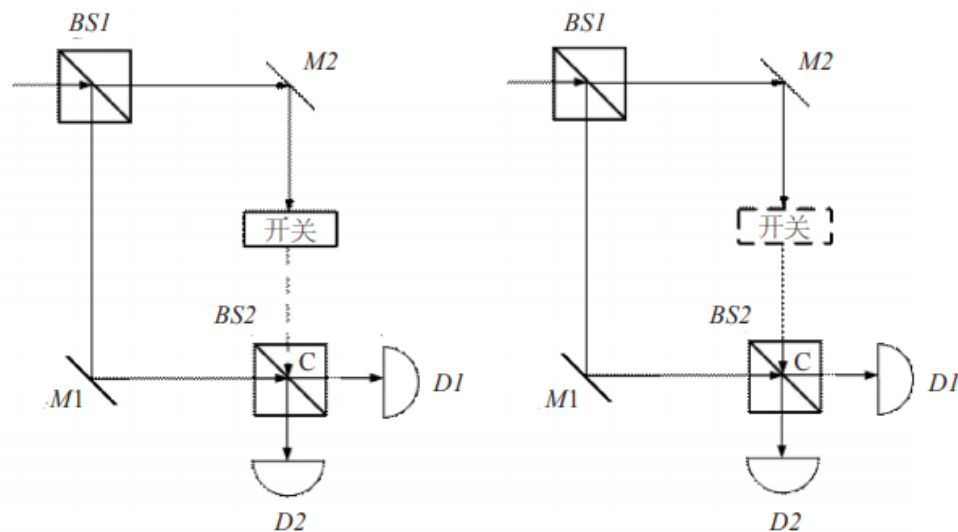
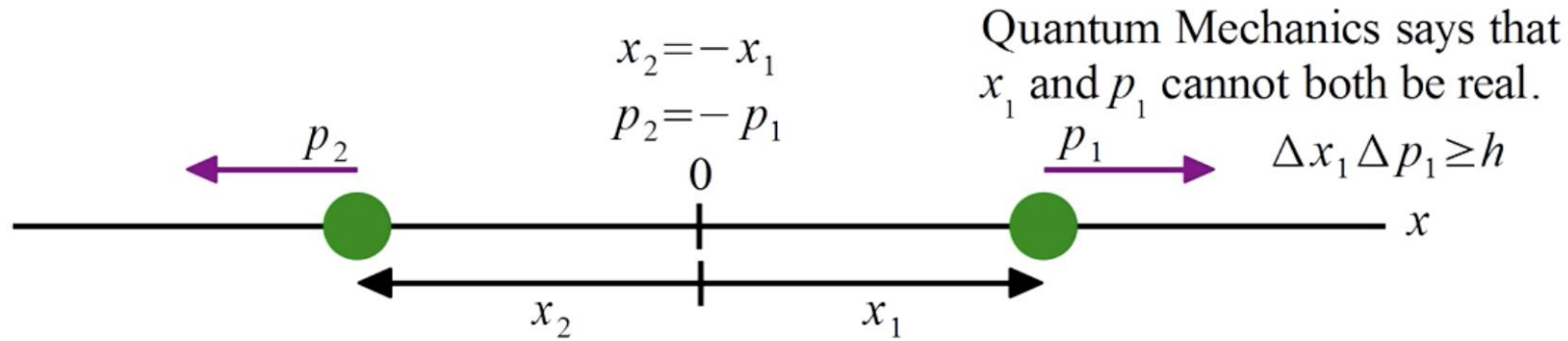
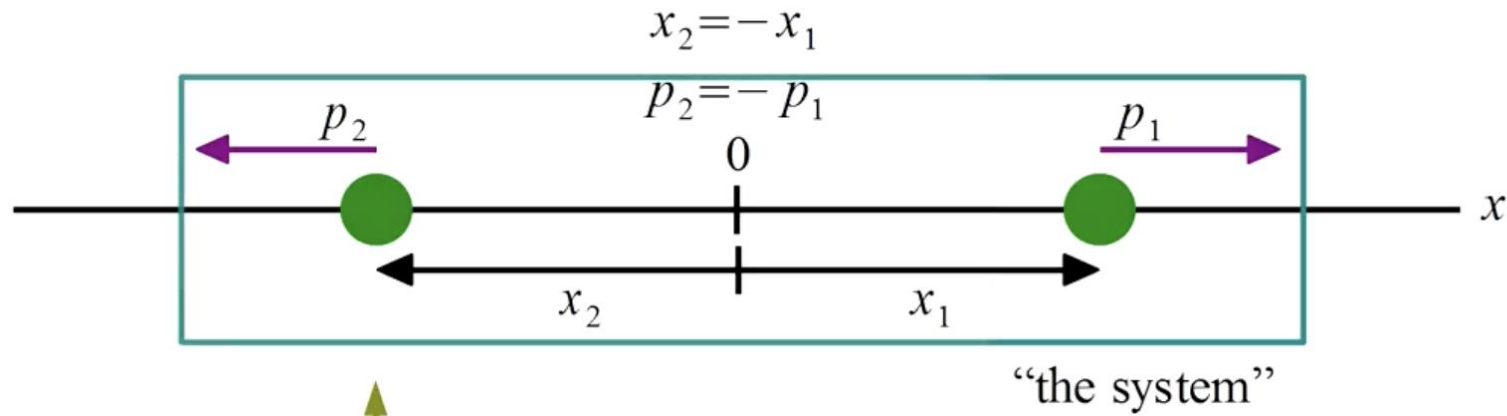


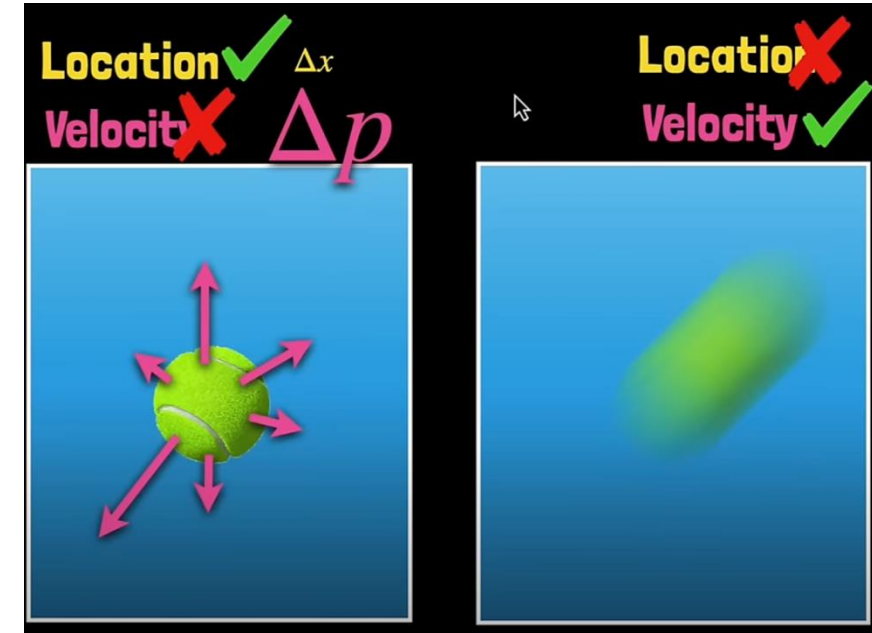
图 2-14 由于引力的存在，从几亿光年以外射出的光也可以有两条路径形成类似的干涉仪，而后选择允许我们现在来决定几亿年前光以怎样的方式走哪一条路径



EPR: “A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system.”

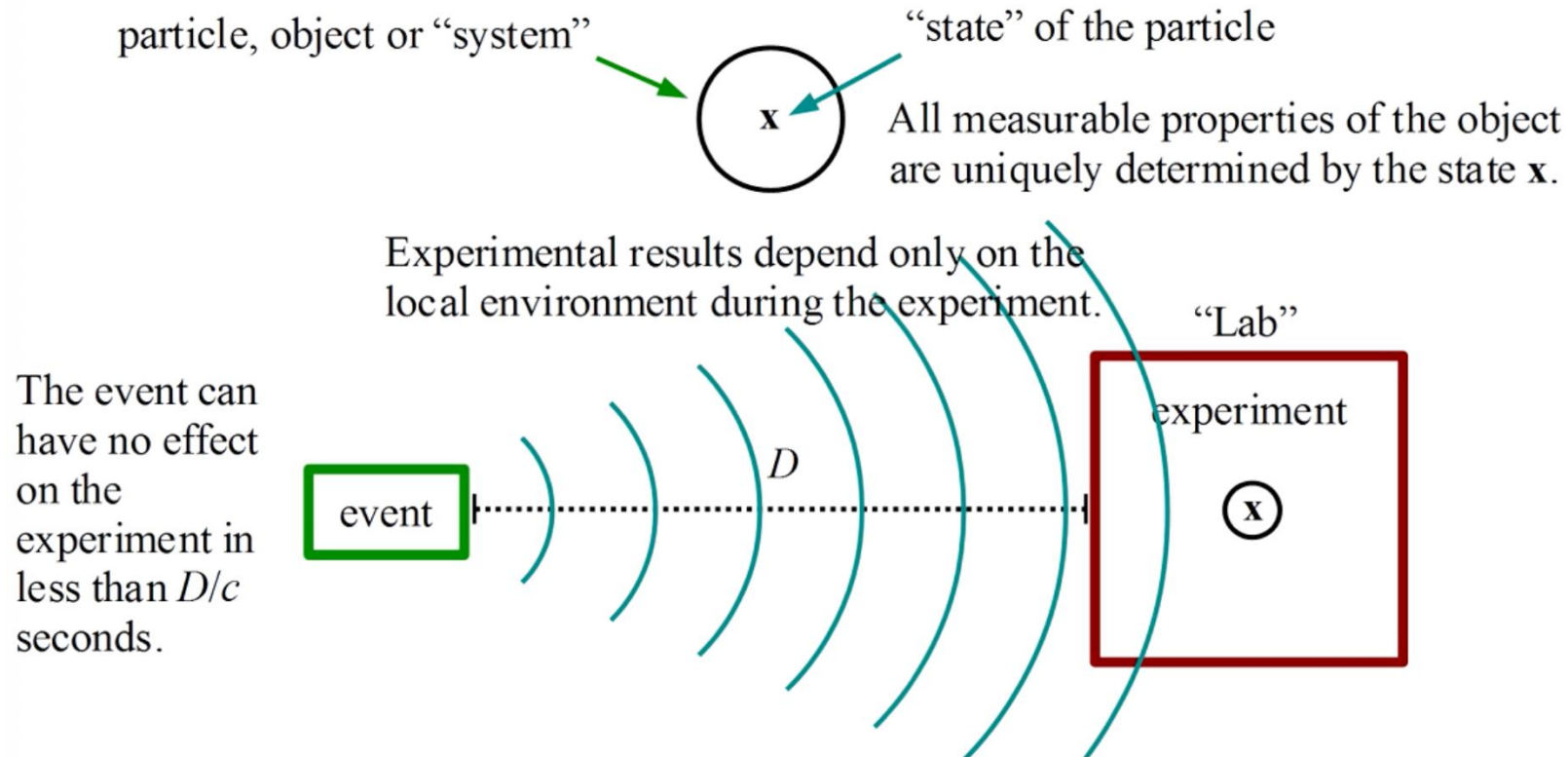


make a measurement here  
 without disturbing “the system”





*Local reality, local causality, locality*



# Quantum Entanglement

- 手套
- 猜黑红/先后顺序的改变改变了什么
- 实验看到了关联 ~ 贝尔不等式

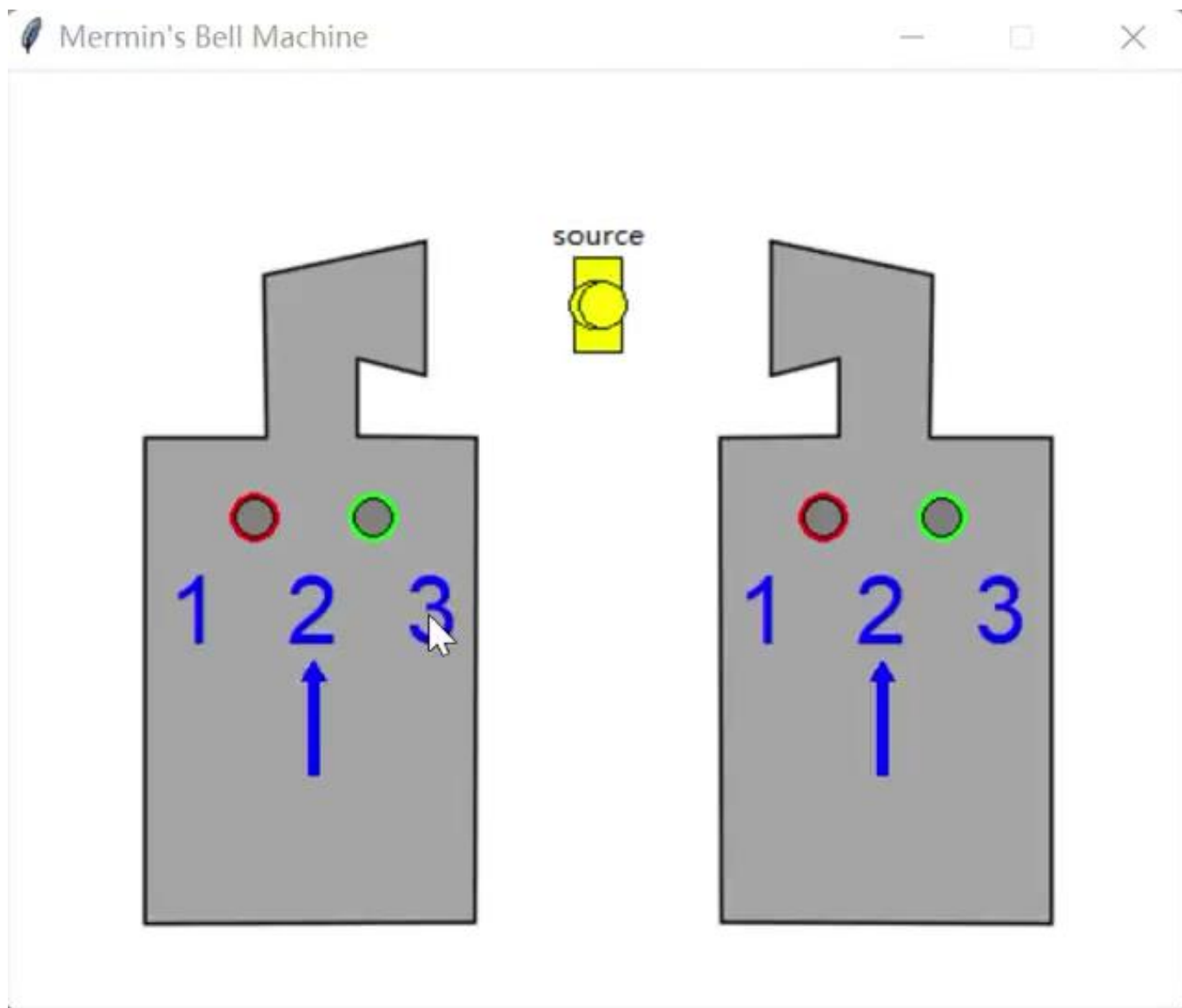


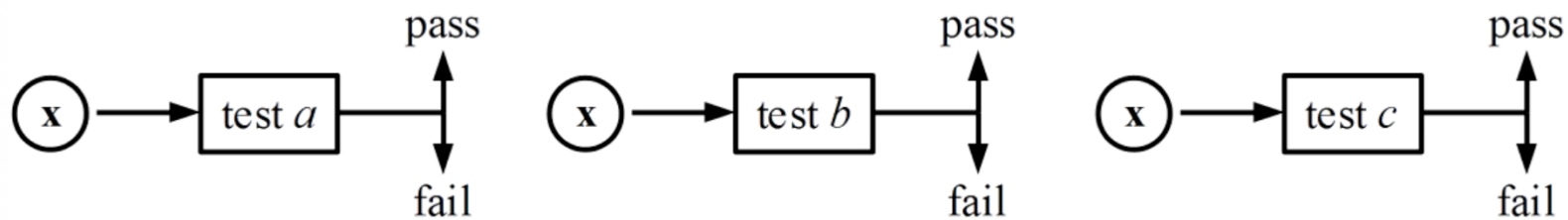
- Random-->测量,

先具有某种确定态而等待测量发生：局域定态，分离足够远，无法告知测量方法，相关性有“隐函数”事先确定；

- Measure rule first-->结果

先确定测量方法，根据测量方法来调整状态，无法有事先安排好的知识，不确定态，只能根据测量方法来随时调整，自己做自己的答案，无“隐函数”





There are 8 possible outcomes of 3 tests.

0 = fail  
1 = pass

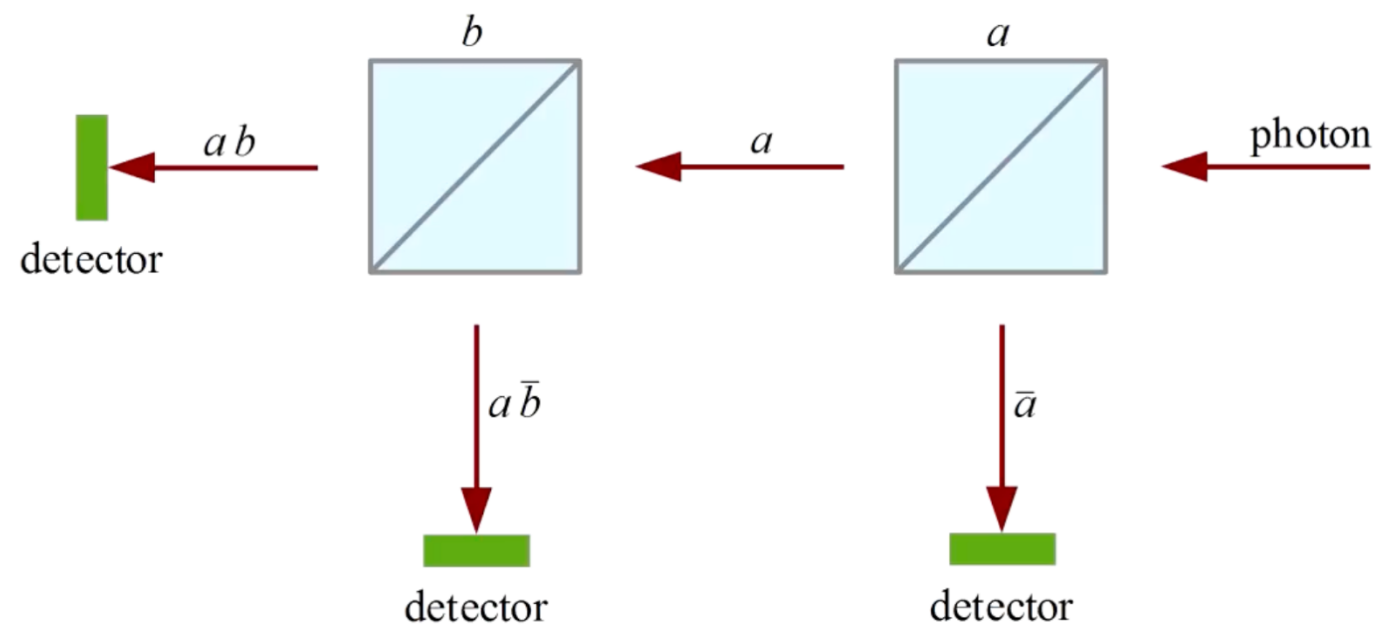
$a$	$b$	$c$	$a\bar{b}$	$b\bar{c}$	$a\bar{c}$
0	0	0			
0	0	1			
0	1	0		$\oplus$	
0	1	1			
1	0	0	+	—	+
1	0	1	$\oplus$		
1	1	0		+ — +	
1	1	1			

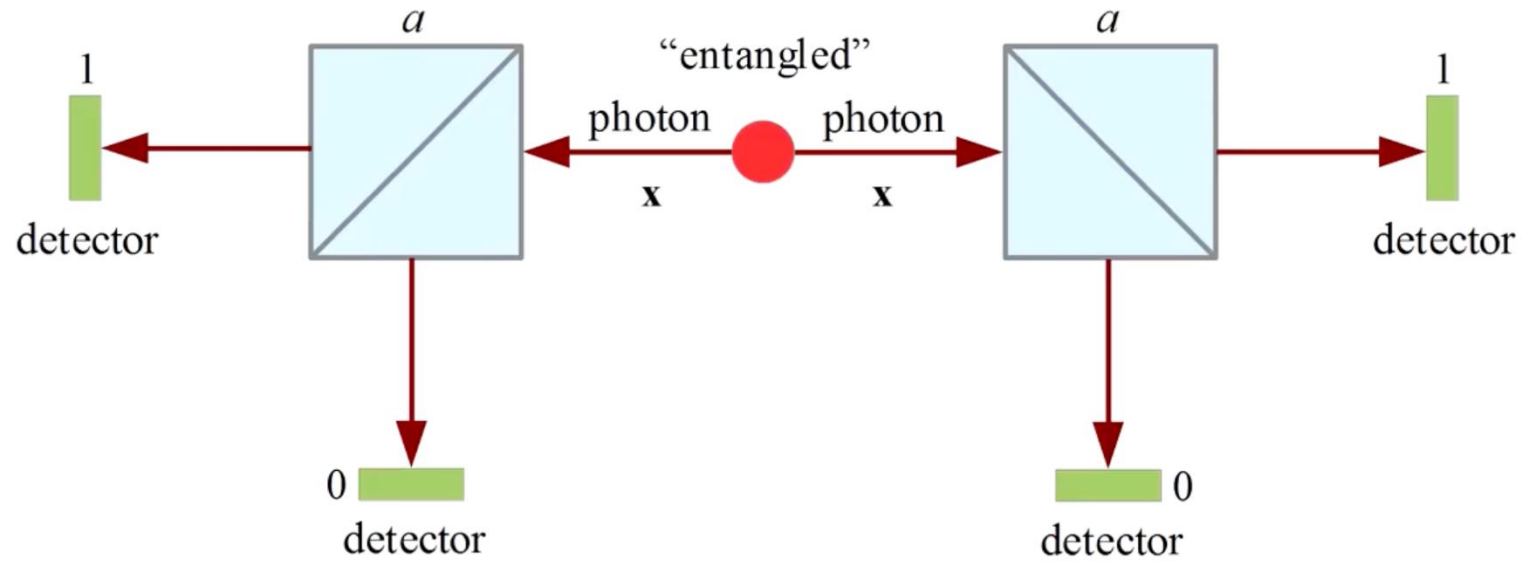
$$N(a\bar{b}) + N(b\bar{c}) \geq N(a\bar{c})$$

$$P(a\bar{b}) + P(b\bar{c}) \geq P(a\bar{c})$$

Bell's inequality

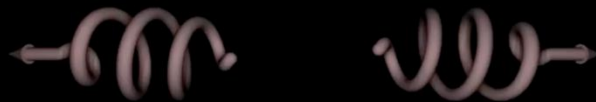
Each state  $x$  corresponds to one, and only one, row.

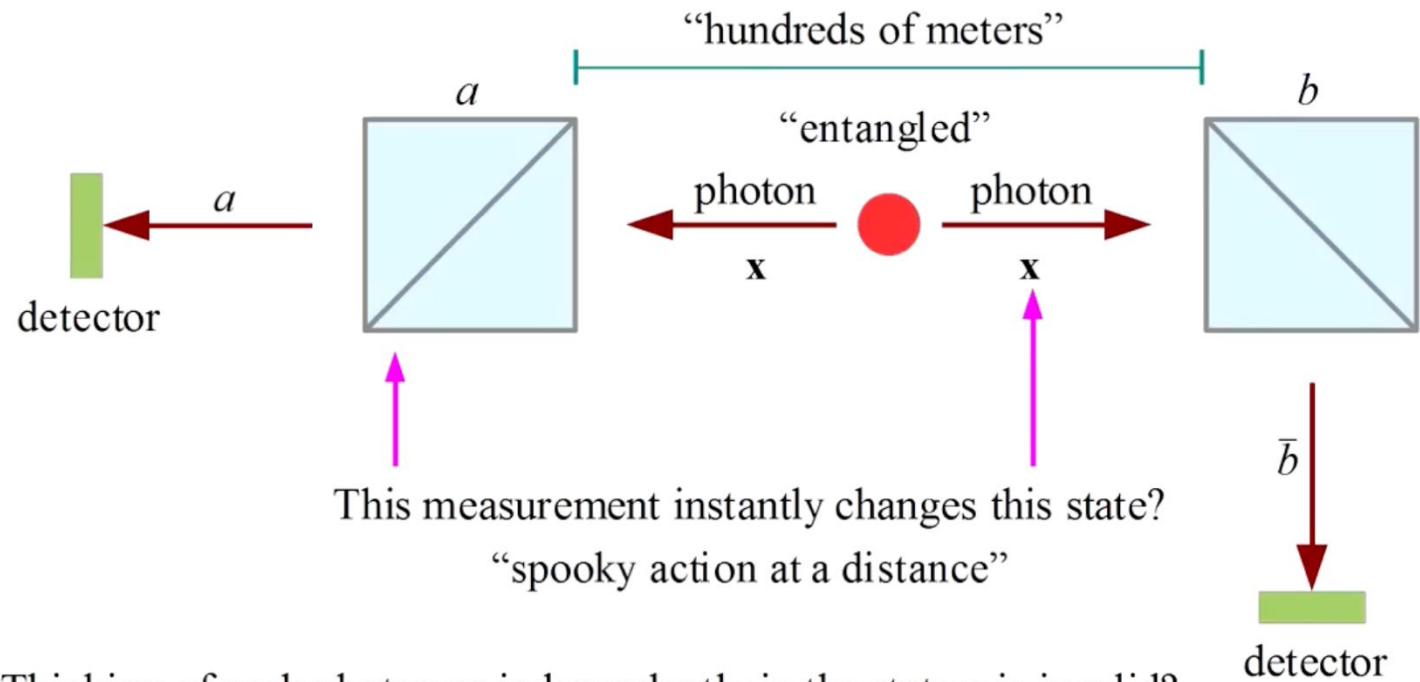




both instruments will record the same random 0,1 pattern  
“quantum cryptography”

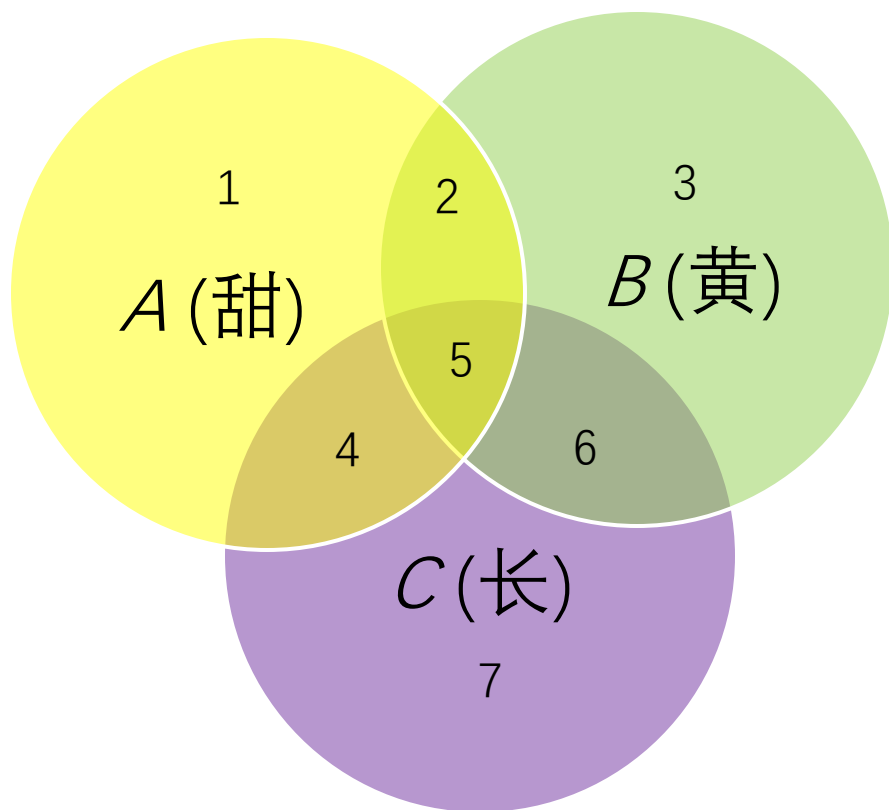
decay of positronium





Thinking of each photon as independently in the state  $x$  is invalid?  
“reality is non-local”





如图中性质已确定↵

$$A \text{ not } B + B \text{ not } C \geq A \text{ not } C \quad \leftarrow$$

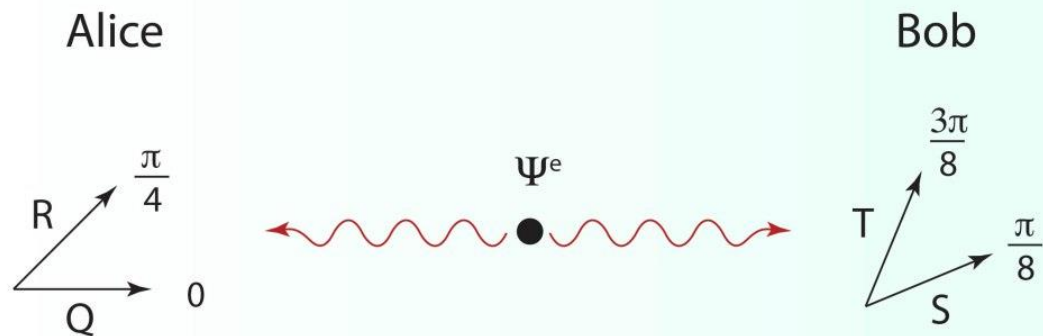
$$1+4 \quad 3+2 \quad 1+2 \quad \leftarrow$$

$$(1 + 2) + (3 + 4) \geq 1 + 2 \quad \leftarrow$$

∴ (3 + 4) 自然成立↵

$$\text{即 } S(A, \Gamma B) + S(B, \Gamma C) \geq S(A, \Gamma C) \quad \leftarrow$$

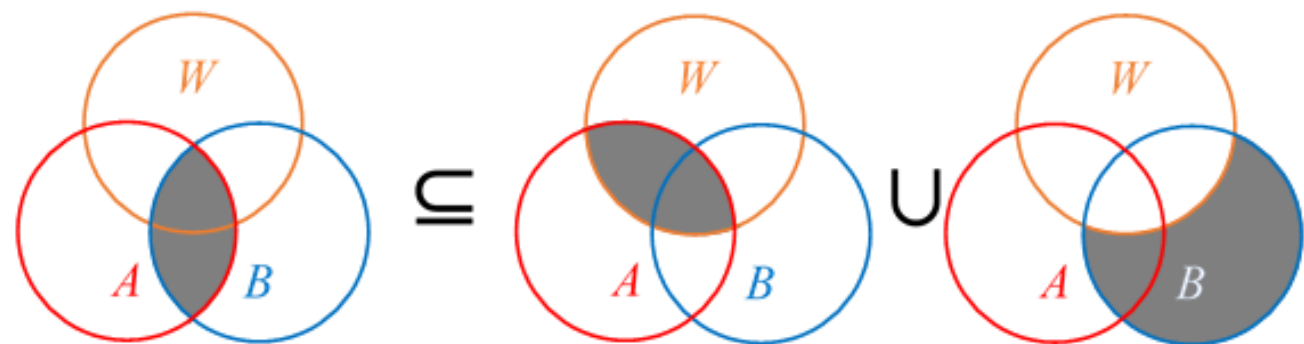
# 贝尔不等式



$$\begin{aligned}\langle QS \rangle &= \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\pi}{8} + \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\pi}{8} - \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\pi}{8} - \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\pi}{8} \\ &= \sin^2 \frac{\pi}{8} - \cos^2 \frac{\pi}{8} = -\cos \frac{\pi}{4} \\ &= -\frac{1}{2} \sqrt{2}\end{aligned}$$

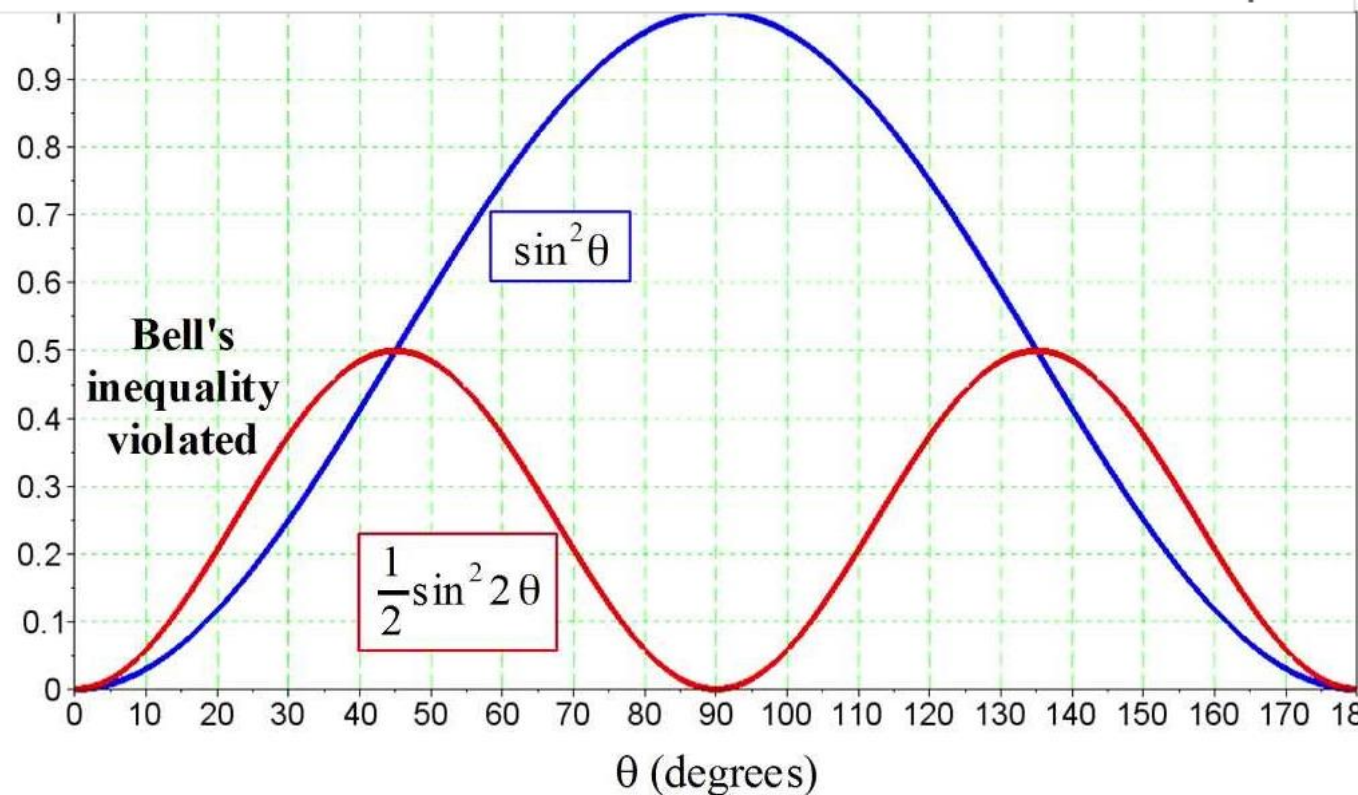
$$\langle QS \rangle + \langle RS \rangle + \langle RT \rangle - \langle QT \rangle = 2\sqrt{2} > 2$$

Bell4.ai

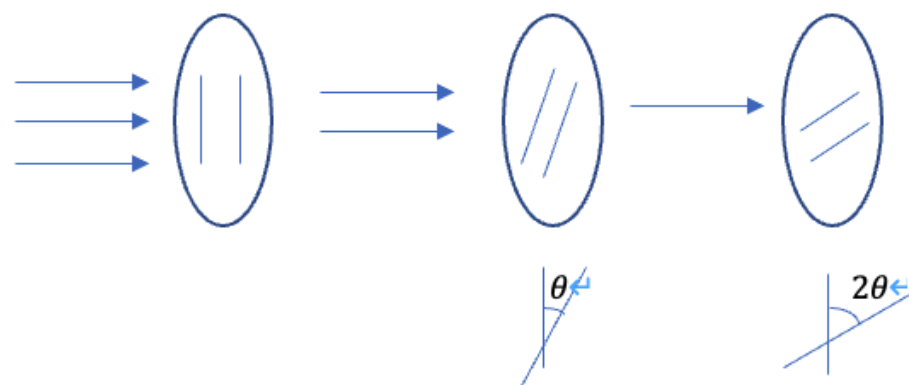
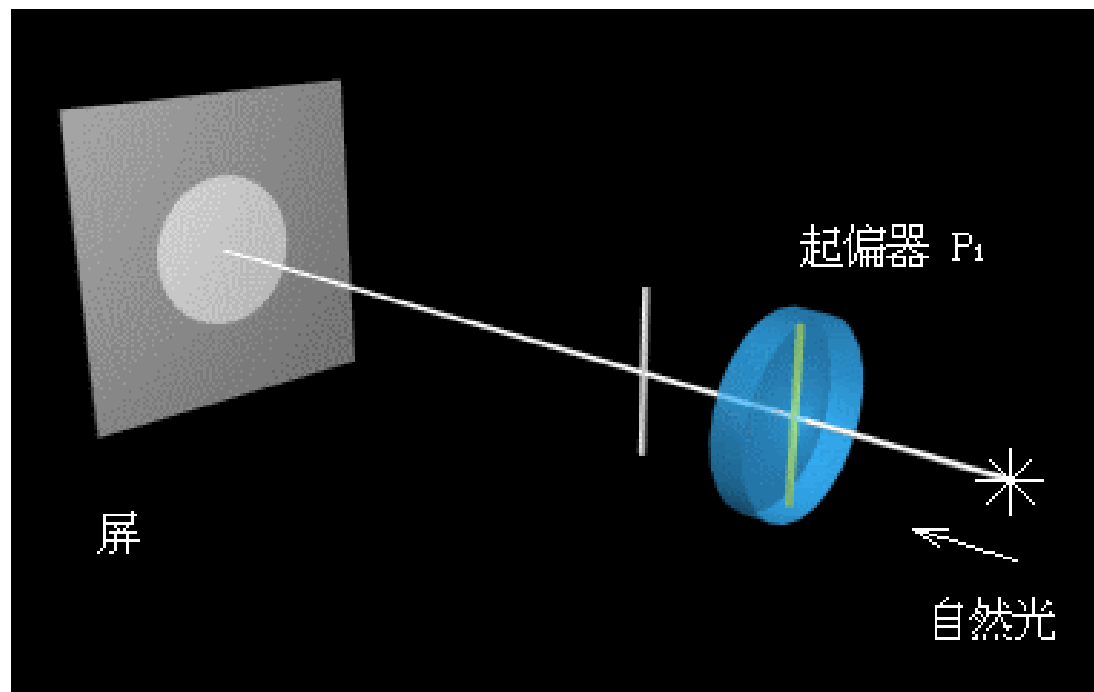


Bell's inequality:  $P(A \cap B) \leq P(A \cap W) + P(\bar{W} \cap B)$

©xseek-qm.net



# 马吕斯定理



$$I_0$$

$$\frac{1}{2} I_0$$

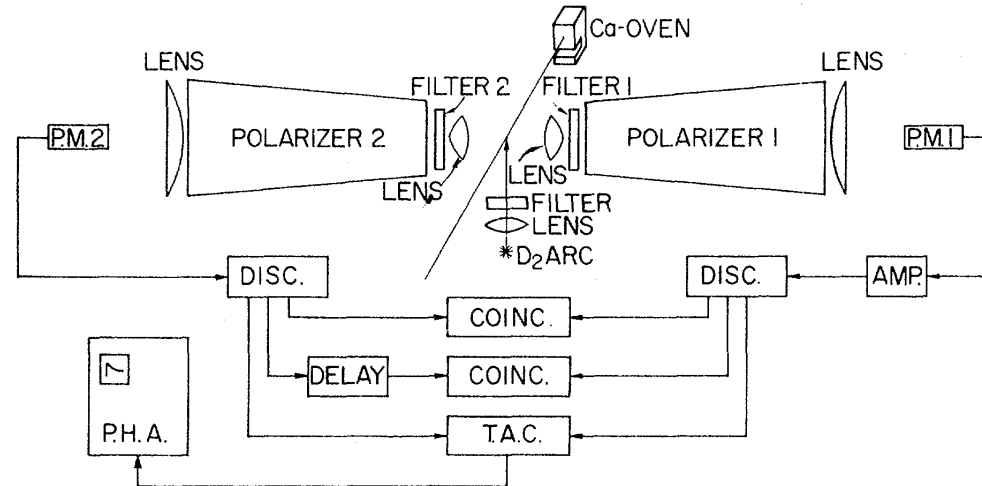
$$\frac{1}{2} I_0 \cos^2 \theta$$

$$P(a, b) = \frac{1}{2} \cos^2 \theta$$

$$P(a, \Gamma b) = \frac{1}{2} (1 - \cos^2 \theta)$$

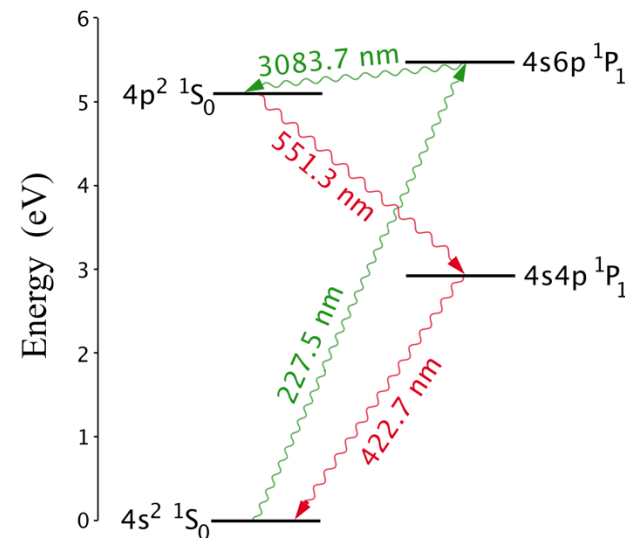
# (1972) Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories

Stuart J. Freedman and John F. Clauser



Beam of Ca atoms excited to  $4s6p^1P_1$  state by  $D_2$  arc lamp.

$\approx 7\%$  decay to the initial state of cascade,  $4p^2^1S_0$ .



# 量子的逻辑链条

光的波动说

1800  
托马斯杨

光的粒子说

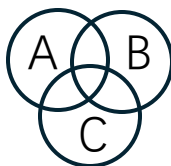
1900 Planck  
1905 Einstein

波粒两相

一切物质  
德布罗意波  
波动方程：概率解释

对两相的解释构成了  
双缝的叠加态

确定域的粒子性



EPR  
爱、波、罗

非定域的波动性

Bell不等式

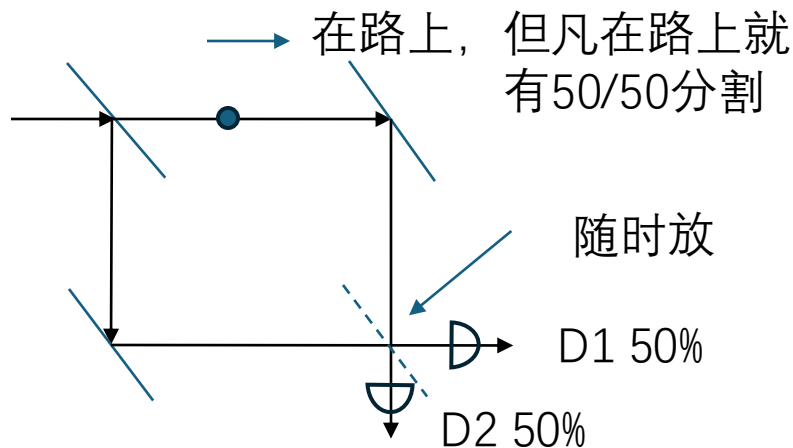
到底是什么

“纠缠的世界里时间是什么？”

粒子只能跟自己干涉

延迟选择？

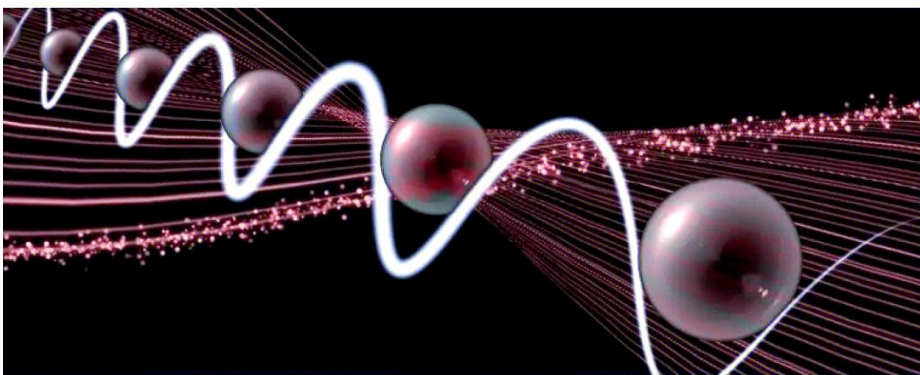
时间轴上的平行世界



# 量子力学核心解释之争

## 哥本哈根诠释 (Copenhagen Interpretation)

- **核心观点**：量子系统在被观测前处于叠加态，测量导致波函数坍缩，使系统随机坍缩到一个确定状态。
- **关键概念**：
  - **波函数坍缩**：观测行为使量子态从概率分布变为确定值。
  - **互补性原理**（玻尔）：量子对象具有波粒二象性，但无法同时观测两种特性。
- **争议**：未明确界定“观测”的定义（是否必须由人类意识引起？）。



## 量子贝叶斯诠释 (QBism)

- **核心观点**：量子态并非客观实在，而是观测者对系统的**主观信念**，波函数坍缩只是信念更新。
- **关键概念**：
  - **概率即信念**：量子概率反映个人对实验结果的预期，而非物理实在。
  - **观测者为中心**：物理现实依赖于观测者的知识状态。
- **争议**：被认为过于主观，难以解释独立于观测者的物理现象。





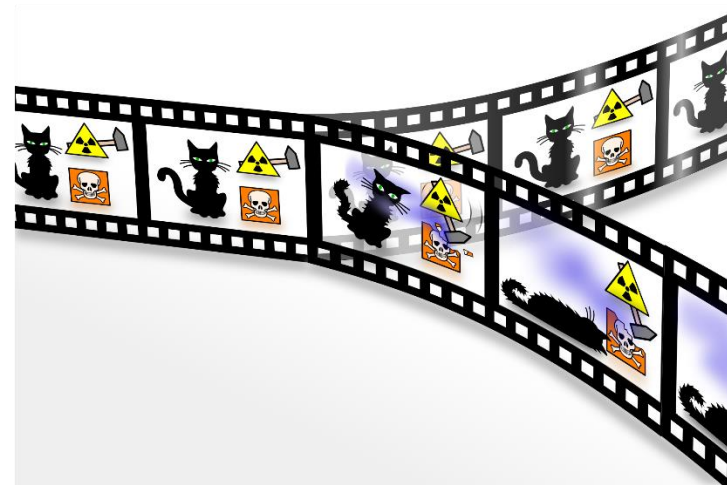
## 坍缩理论 (Objective Collapse Theories)

- **核心观点**：波函数坍缩是客观物理过程，而非由观测引起。
- **典型模型**：
  - **GRW理论** (Ghirardi-Rimini-Weber)：波函数会自发坍缩，坍缩概率与系统复杂度相关。
  - **Penrose引力坍缩**：引力效应导致宏观系统的波函数坍缩。
- **争议**：尚未找到实验证据支持自发坍缩机制。



## 多世界诠释 (Many-Worlds Interpretation, MWI)

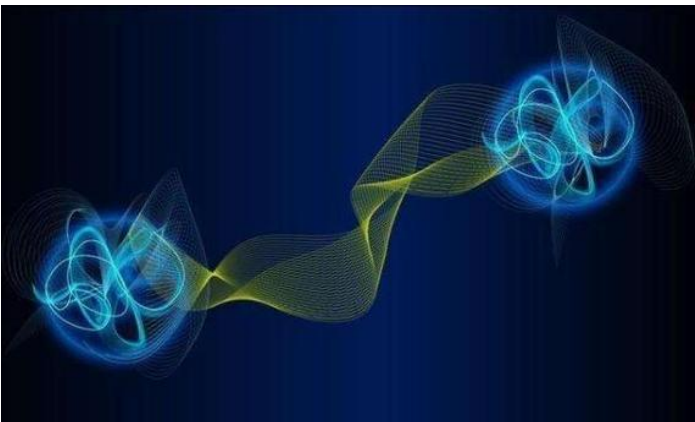
- **核心观点**：波函数从不坍缩，所有可能的量子态都真实存在，但宇宙“分裂”成多个平行世界，每个世界对应一个可能的测量结果。
- **关键概念**：
  - **退相干** (Decoherence)：量子态与环境相互作用导致“分裂”，但观测者只能感知其中一个分支。
  - **无坍缩**：量子演化始终遵循薛定谔方程。
- **争议**：无法直接验证平行世界，且可能违背奥卡姆剃刀原则（假设过多实体）。





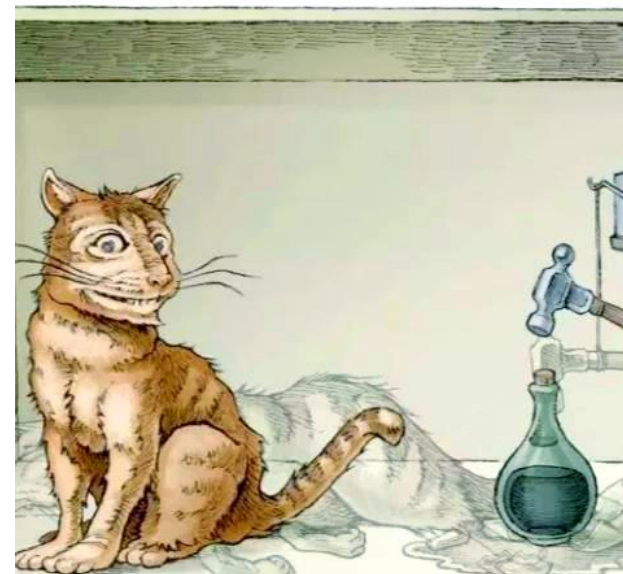
# 隐变量理论 (Hidden Variable Theories)

- **核心观点：**量子随机性源于尚未发现的“隐变量”，若能找到这些变量，量子行为可完全预测。
- **典型代表：**
  - **德布罗意-玻姆理论 (Pilot-Wave Theory)：**粒子具有确定位置，但受“量子势”引导，表现出波动性。
  - **贝尔实验：**多数隐变量理论被贝尔不等式实验证伪，但非局域隐变量理论（如玻姆力学）仍可能成立。
- **争议：**隐变量理论通常需要“超距作用”，违背爱因斯坦的局域性要求。



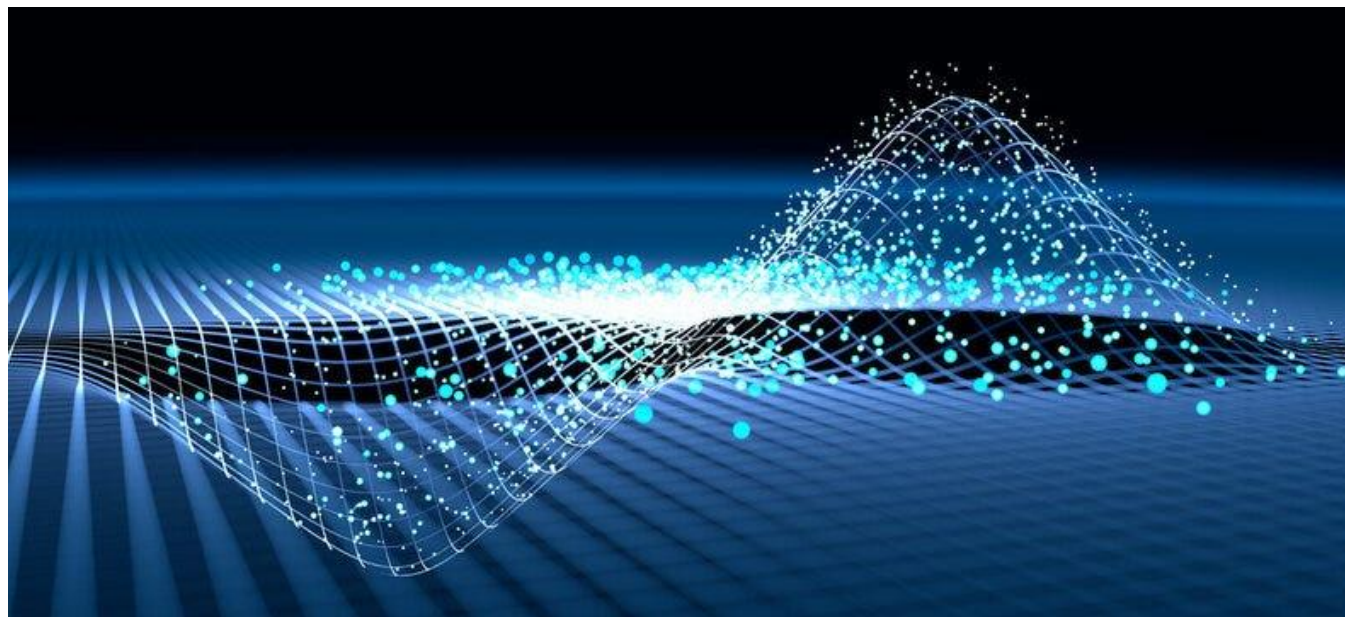
# 系综诠释 (Ensemble Interpretation)

- **核心观点：**量子力学仅描述大量相同系统的统计行为，而非单个粒子的确定性状态。
- **关键概念：**
  - **波函数描述统计系综：**如电子双缝干涉是大量电子的统计结果，而非单个电子的行为。
  - **不涉及坍缩：**测量只是从系综中抽取一个样本。
- **争议：**无法解释单个量子系统的行为（如薛定谔猫）。



# 关系性量子力学 (Relational Quantum Mechanics, RQM)

- **核心观点：** 量子态是相对的，取决于观测者与被观测系统的关系，不存在绝对的量子态。
- **关键概念：**
  - **无绝对现实：** 不同观测者可能记录不同的测量结果，且都正确。
  - **信息交互为核心：** 量子现象源于系统与观测者的互动。
- **争议：** 难以协调不同观测者之间的“现实冲突”。



# 总结对比

诠释	波函数塌缩	现实观	观测者角色	典型支持者
哥本哈根	有	观测依赖	关键	玻尔、海森堡
多世界	无	多重平行宇宙	无关（仅感知分支）	埃弗雷特、德威特
德布罗意-玻姆	无	确定性隐变量	无关	玻姆
量子贝叶斯	主观坍缩	个人信念	核心	Fuchs、Schack
系综诠释	无	统计描述	无关	爱因斯坦（部分支持）
关系性量子力学	相对坍缩	关系性现实	互动决定	Rovelli
坍缩理论（GRW）	客观自发坍缩	宏观确定性	无关	Ghirardi

# 哲学与科学意义

1

**实在论 vs 反实在论：**哥本哈根、QBism 偏向反实在论,多世界、隐变量偏向实在论。

2

**观测者问题：**是否必须引入“意识”或“经典仪器”作为坍缩条件？

3

**实验验证：**多世界和坍缩理论尚无直接验证,但未来实验（如更大规模的量子退相干研究）可能提供线索。

## 同一律，也就是每个事物都与其自身相同的逻辑原则

1. superposition: 在量子力学中，粒子可以同时处于多种状态。例如，一个电子可以同时处于多个位置，直到被观测时才“坍缩”到一个确定的状态。因为它意味着在特定时刻，一个粒子不完全等同于其任何单一状态。
2. Entanglement: 量子纠缠现象中，两个或多个粒子形成一个整体系统，无论它们相距多远，一个粒子的状态会即时影响另一个粒子的状态。纠缠粒子作为一个整体的行为不能仅仅通过考虑它们各自的独立状态来完全理解。
3. Duality: 量子物体展示出既像波又像粒子的特性。它暗示着一个实体在不同情况下可以表现出完全不同的性质。
4. 观测: 在量子力学中，观测者的存在和观测行为本身会影响到量子系统的状态。这意味着，一个量子系统在未被观测时与被观测时可能不是“同一”的。

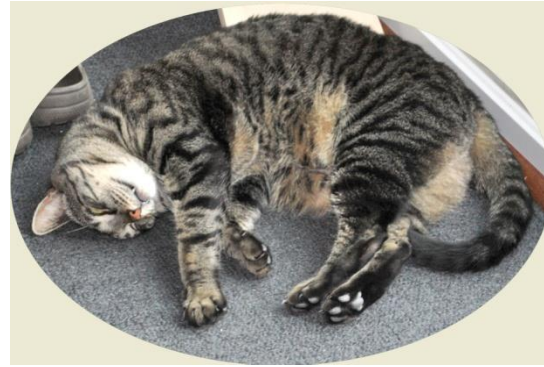
**矛盾律**是指一个命题和它的否定不能同时为真。

1. 波粒二象性：量子物体如光子或电子表现出既是波又是粒子的性质。根据经典逻辑，一个实体不能同时是波和粒子，因为这两种性质在经典物理中是相互排斥的。然而，在量子层面，这种“矛盾”的共存是自然现象的基本特性。
2. superposition：量子超位置原理表明，一个量子系统在没有被观测之前可以同时处于多个状态。例如，薛定谔的猫实验思想实验描绘了一只猫在未被观测前同时处于“活”和“死”状态。这个概念挑战了传统逻辑中的矛盾律，因为它允许一个实体在某种意义上同时处于两个相互排斥的状态。
3. 量子纠缠和非定域性：在量子纠缠现象中，两个粒子的状态在空间上是非定域相关的。这意味着，对一个粒子的测量会即时影响到另一个粒子的状态，无论它们相距多远。在某些情况下，这种非定域性被解释为同时存在相互矛盾的状态，挑战了矛盾律的传统理解。

# 经典猫态



OR





# ⊛ 量子力学的超越经典逻辑 VS 佛教

经典比特



0



1

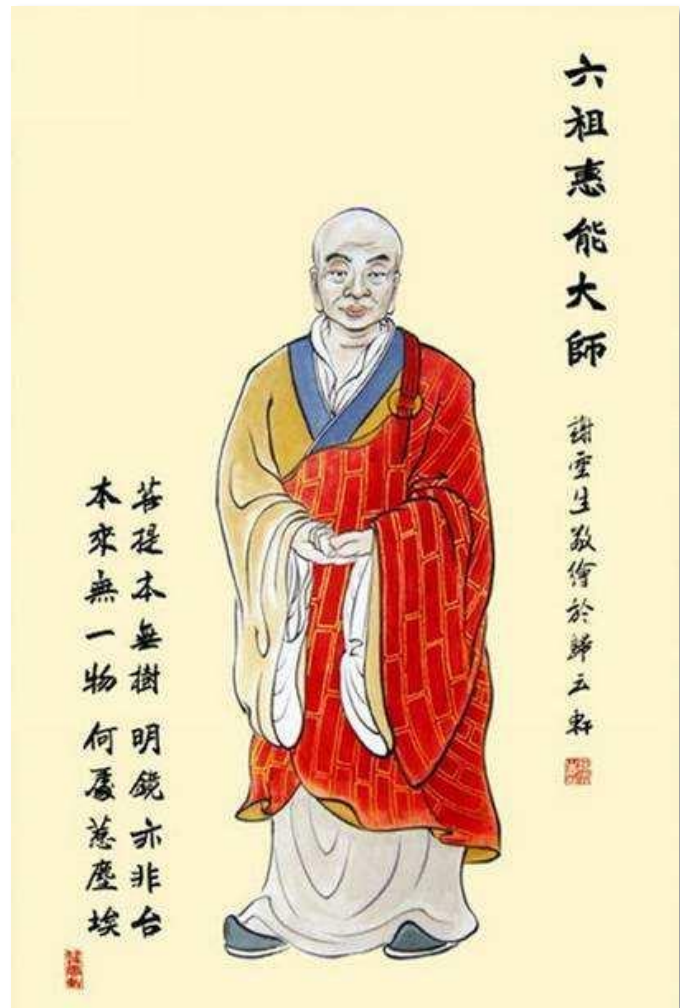
量子比特

$|0\rangle$

$|1\rangle$

叠加态

$|\text{standing dinosaur}\rangle + |\text{lying dinosaur}\rangle$





# Quantum Superposition 量子叠加猫态

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left| \text{Sleeping Cat} \right\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \text{Awake Cat} \right\rangle$$
$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left| \text{Sleeping Cat} \right\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \text{Awake Cat} \right\rangle$$

The diagram illustrates quantum superposition using two cats. The top equation shows a superposition of a sleeping cat and an awake cat with a positive sign. The bottom equation shows a superposition of the same two states with a negative sign. Each state is represented by a circular image of a tabby cat, with a vertical line and a chevron symbol indicating the quantum state.



**排中律**是指出对于任何命题，该命题或其否定中必有一个是真的。

1. Superposition: 量子力学中的超位置原理表明，一个量子系统在被观测之前可以同时处于多个状态。这意味着，一个量子粒子在没有被观测时并不一定处于某个特定状态或其完全相反的状态。例如，在薛定谔的猫实验中，猫在盒子被打开前既不是完全活着也不是完全死亡，而是处于这两种状态的叠加。
2. 量子不确定性：海森堡不确定性原理表明，我们无法同时精确知道一个粒子的位置和动量。这种不确定性意味着对于某些属性的确切测量值，我们不能断言它们处于某个特定值或非那个值，因为在某些情况下这两种情况都不成立。
3. 观测者的作用：在量子力学中，观测者的作用是根本性的。一个量子系统的状态在被观测之前并不一定是确定的。这种依赖于观测的性质挑战了传统的排中律，因为系统的真实状态在观测之前并不遵循“是或非”的二元逻辑。

## 因果律

1. 量子不确定性 Uncertainty: 海森堡的不确定性原理表明，我们不能同时准确地知道一个量子粒子的位置和动量。这种不确定性意味着，未来的某些事件无法用传统的因果关系完全预测。在微观量子层面，事件似乎发生在没有明确因果路径的情况下。
2. 超位置状态: 量子系统在未被观测之前可以同时处于多个可能的状态（超位置）。这意味着在量子层面，系统的未来状态不是由单一的、明确的因果链决定的，而是由一系列潜在可能性的叠加决定的。
3. 量子纠缠与非定域性: 在量子纠缠现象中，两个或多个粒子的状态彼此相关，即使它们相距很远。当对其中一个粒子进行测量时，另一个粒子的状态也会立即改变。这种非定域性挑战了经典因果律的局限性，因为传统的因果关系似乎要求信息不能超过光速传播。
4. 因果关系的可逆性 causality reversibility: 在量子力学中，某些过程在时间上是可逆的，这与我们日常经验中的单向因果链不同。这意味着在量子层面，因果关系可能不像在宏观层面那样清晰和单向。
5. 观测者的作用: 在量子物理中，观测者的作用至关重要。观测行为本身似乎影响或决定量子系统的状态。这种现象在某种程度上挑战了因果律，因为观测者的介入似乎在某些情况下是事件发生的必要条件。

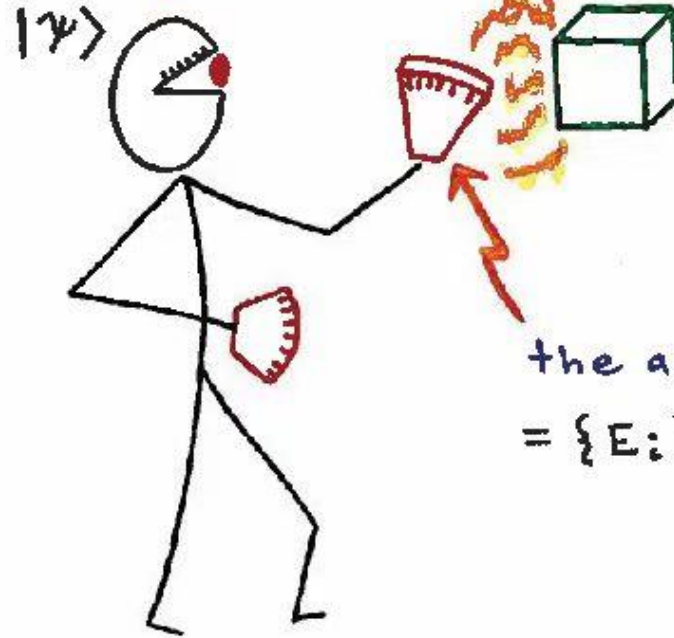
## 量子逻辑？

1. 重新考虑经典逻辑原则：在经典逻辑中，排中律和矛盾律是基本原则。
2. 量子叠加和不确定性：量子逻辑试图解释量子叠加和不确定性原理。这意味着量子逻辑允许一个系统在某个时刻同时处于多个状态，而不是严格遵循经典逻辑的“是”或“非”二元结构。
3. 量子纠缠：量子逻辑还试图解释量子纠缠现象，其中粒子之间的状态似乎是即时相连的，即使它们彼此相距很远。这种非定域性违背了经典逻辑和物理学中的因果关系。
4. 观测者的作用：在量子力学中，观测者的角色非常重要，而量子逻辑试图解释观测如何影响或决定系统的状态。这与经典逻辑中的客观性原则不同，后者假设外部世界的属性与观测者无关。
5. 形式化语言和数学结构：量子逻辑通常使用形式化的语言和数学结构来描述逻辑关系，这些结构与经典逻辑的结构有显著不同。例如，它可能使用希尔伯特空间的数学框架来表述逻辑命题。

# Quantum Bayesian?

the consequence  
= an experience,  $E_k$

the catalyst  
= quantum  
system,  
 $\mathcal{H}_d$



the action  
=  $\{E_i\}$ , a POVM

量子贝叶斯统计（通常简称为“QBism”或量子贝叶斯主义）是一种解释量子力学的哲学和理论框架。这个框架将贝叶斯概率理论应用于量子力学，主张量子状态不是一个物理系统的实际属性，而是代表观测者对系统状态的知识 and 信念。

1. 观测者依赖性：量子贝叶斯主义强调观测者在量子测量中的作用。在这个观点中，量子态（例如波函数）是观测者对量子系统的个人信念或知识的表达，而不是独立于观测者存在的物理实体。
2. 贝叶斯更新规则：在量子贝叶斯统计中，当观测者获得新信息时，他们会使用贝叶斯规则更新对量子系统状态的信念。这意味着量子测量不是揭示系统本身的固有属性，而是观测者关于系统的知识状态的更新。
3. 主观概率：与传统的量子力学解释不同，量子贝叶斯主义认为概率是主观的，反映了观测者对量子事件发生的个人信念。
4. 对量子纠缠的解释：量子贝叶斯主义提供了对量子纠缠的独特解释，认为纠缠反映了观测者对两个或多个量子系统之间关联的信念，而不是实际的物理连接。

量子贝叶斯统计在量子力学的解释上提供了一个更加主观的视角，与哥本哈根解释、多世界解释等其他量子力学解释形成对比。它是量子力学哲学和基础问题中的一个活跃研究领域，引起了物理学家和哲学家的广泛关注和讨论。

# Why we need a universal law?

- We cant tell where is the boundary
- More things down there, where?
- Many means more but how more?