

PDF 翻译与高三解读笔记

生成时间: 2025/12/3 23:08:54

第 1 页

【原文翻译】

惠勒延迟选择思想实验的实验实现

****V. Jacques¹, E Wu^{1,2}, F. Grosshans¹, F. Treussart¹, P. Grangier³, A. Aspect³, and J.-F. Roch³,**

¹卡尚高等师范学院, 量子与分子光子学实验室, UMR CNRS 8537, 卡尚, 法国

²华东师范大学, 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海, 中国

³光学研究所, 夏尔·法布里实验室, UMR CNRS 8501, 奥赛, 法国

*通信地址: roch@physique.ens-cachan.fr

摘要

波粒二象性这一量子“无法消除的奥秘”(费曼语), 通过惠勒的延迟选择思想实验 (GedankenExperiment) 以一种惊人的方式得到了阐释。在这个实验中, 双路径干涉仪的配置是在单光子脉冲已经进入干涉仪之后才被选定的: 我们要么闭合干涉仪 (即两条路径重新结合) 并观察干涉现象, 要么保持干涉仪开放并测量光子所经过的路径。我们在此报告了该思想实验的一次近乎理想的实现。由于光脉冲是真正的单光子, 从而允许明确的“哪条路径”(which-way) 测量; 而干涉仪拥有两条空间上分离的

路径，能产生高可见度的干涉条纹。在测量开放或闭合配置之间的选择是由一个量子随机数发生器完成的，并且——在相对论意义上——该选择与光子进入干涉仪是类时分隔（space-like separated）的。闭合配置下的测量显示出可见度为 94% 的干涉，而在开放配置下的测量使我们能够以低于 1% 的误差概率确定光子所走的路径。

arXiv:quant-ph/0610241v1 2006年10月28日

左栏内容

杨氏双缝实验，若通过每次仅发送一个粒子穿过干涉仪来实现，便触及了量子力学的核心 (1)。其惊人的特征在于，被解释为波同时沿两条路径传播的干涉现象，与我们对粒子的常识性表征是不相容的，后者意味着粒子要么沿一条路径走，要么沿另一条路径走，但不能同时走两条。几个真正的单光子干涉实验 (2, 3, 4, 5, 6) 已经清晰地证实了光场的波粒二象性。为了理解其含义，请考虑图 1 中描绘的单光子干涉实验。在**闭合干涉仪配置**中，单光子脉冲被马赫-曾德尔（Mach-Zehnder）干涉仪的第一个分束器 BS_input 分裂，并穿过干涉仪，直到第二个分束器 BS_output 重新结合这两个干涉臂。当两臂之间的相移 Φ 变化时，输出端口 1 和 2 的探测概率呈现出调制变化，分别为 $\cos^2\Phi$ 和 $\sin^2\Phi$ 。这个结果是波所预期的，正如惠勒所指出的，“[这] 是证据……表明每一个到达的光量子都是通过**两条**路径到达的” (7)。如果分束器 BS_output 被移除（**开放配置**），输出端口上的每个探测器 D1 或 D2 就会关联到干涉仪的某一条路径，并且——只要使用的是单光子光脉冲，“[要么] 一个计数器响，[要么] 另一个响。因此光子仅行经了**一条**路线” (7)。这样的实验支持了玻尔的陈述，即量子系统的行为由对其执行的测量类型决定 (8)。此外，很明显，对于这里考虑的两个互补测量，相应的实验设置是互斥的，即分束器 BS_output 不能同时被插入和移除。

在两个设置之间的选择是提前很久做出的实验中，人们可以将玻尔的互补性与爱因斯坦对物理实在的定域概念调和起来。确实，当光子进入干涉仪时，它可以接收关于所选实验配置的一些“隐藏信息”，然后根据其行为进行调整 (9)。为了排除这种对量子力学互补性过于幼稚的解释，J. A. 惠勒提出了“延迟选择”思想实验，在该实验中，决定观察哪种性质的选择是在光子已经通过第一个分束器 BS_input **之后**才做出的。“因

此，人们是在光子已经完成了它的旅程**之后**，才决定光子应当是走一条路线，还是走两条路线” (7)。

右栏内容

自惠勒提出建议以来，已报道了几个开创性的延迟选择实验 (10, 11, 12, 13, 14, 15)。然而，它们都没有完全遵循原始方案，即要求使用单粒子量子态，并在所执行测量的选择与粒子进入干涉仪之间实现类时分隔 (space-like separation)。我们在此报告在一个非常接近图 1 所描述的理想原始建议的方案中，“延迟选择”实验的实现。插入或移除分束器 BS_output 的选择是使用量子随机数发生器 (QRNG) 随机决定的。QRNG 位于靠近输出分束器 BS_output 的位置，且距离输入端足够远，以至于关于选择的任何信息都无法在光子通过输入分束器 BS_input 之前到达光子。

我们之前开发的用于量子密钥分发的单光子源 (17, 18) 是基于金刚石纳米晶体中单个 N-V 色心的脉冲式光激发光致发光 (19)。在单发射体水平上，这些光致发光中心（可以使用共聚焦显微镜单独寻址 (20)）在室温下显示出了无与伦比的效率和光稳定性 (21, 22)。此外...

【高三解读】

高三物理深读：当光子面临“马后炮”的选择

你好！看到这篇论文，你可能会觉得它只是另一个枯燥的物理实验，但实际上，它在讨论一个近乎科幻的话题：**我们现在的决定，能否改变过去的“事实”？**

这篇论文是2006年发表的一项重磅成果，验证了物理学泰斗惠勒（John Wheeler）提出的一个疯狂想法——“延迟选择实验”。作为一名高三学生，你已经掌握了干涉、波粒二象性和相对论的基础，现在让我们把这些知识串起来，看看这个实验是如何挑战我们世界观的。

1. 核心概念：光是波还是粒子？由你说了算，哪怕是“事后”诸葛亮

在高中物理课本里，杨氏双缝实验告诉我们：

- 如果你不看光子走哪条缝，它就表现出**波动性**（发生干涉，同时走两条路）。

- 如果你在缝隙处放个探测器盯着它，它就表现出**粒子性**（只走一条路，干涉消失）。

惠勒的“脑洞”在于： 如果我们把做决定的时间推迟呢？

想象一下，光子已经穿过了第一道门（分束器 BS_input），就像一个人已经走进了岔路口。此时，它“理应”已经决定了是像幽灵一样分身走两边（波），还是像子弹一样走一边（粒子）。

但是，惠勒说：等等，我们在终点线前再做决定！

- **闭合配置 (Closed)：** 我们在终点放第二块分束器 (BS_output)。这就像把两条路汇合，强迫光子展示干涉条纹（波的特性）。
- **开放配置 (Open)：** 我们把终点的分束器撤走。光子只能直接撞在左边或右边的探测器上，暴露它只走了一条路（粒子的特性）。

这篇论文最震撼的结论是：**哪怕光子已经进去了，已经在路上了，我们在最后一刻才决定是否放入第二块分束器，光子依然能“完美配合”我们的选择！** 仿佛光子能预知未来，或者在终点“逆转时间”回去修改它起点的行为。当然，物理学家不认为真的有时光倒流，但这揭示了量子世界的本质——**“实在”并非独立于观测而存在。**

2. 难点拆解：如何证明没有“作弊”？

这篇论文之所以牛，是因为它堵死了所有的“漏洞”。这里有两个高考级别的物理知识点应用：

- **难点一：真正的“单光子”(Single-photon)**
 - **普通光源**（如激光）其实是一大堆光子蜂拥而至，很难分清是单个光子自己干涉，还是光子之间互相干涉。
 - **本实验突破：**他们用金刚石里的“N-V色心”（你可以理解为一把超级精准的狙击枪），每次只发射**一个光子**。这就排除了“光子互相商量”的可能性。
- **难点二：相对论意义上的“类时分隔”(Space-like separation)**
 - **问题：**如果我在终点做决定时，有一条秘密电报以光速传回起点告诉光子“嘿，他要测粒子性了，快变身！”，那实验就不严谨了。
 - **本实验突破：**利用狭义相对论。他们把做决定（QRNG）的地方放得很远，且决定做得极快。快到什么程度？快到即便信息以光速传播，也来不及在光子通过第一道门之前传过去。在时空图中，这两件事处于彼此的“光锥”之

外。这就是文中提到的“Einstein's local conception” (爱因斯坦的定域性概念)。既然没有信息能传回去，光子就不可能提前知道我们要怎么测它。

3. 知识联想：从课本到前沿

让我们把你学过的知识连线：

- **数学与波**：文中提到的探测概率 $\cos^2\phi$ 和 $\sin^2\phi$ ，正是你在三角函数里学过的。在物理中，波的叠加原理导致振幅相加，强度的变化正是相位的余弦函数。这告诉你，高中数学不仅是解题工具，更是描述宇宙法则的语言。
- **哲学思辨（玻尔 vs 爱因斯坦）**：
 - 爱因斯坦（实在论）：月亮即使没人看，它也在那里。光子在进门时就应该有确定的状态。
 - 玻尔（互补原理）：不论你何时做决定，物理系统的性质由“测量方式”决定。不测量，就没有确定的“路径”。
 - 这个实验结果，在这个回合，**玻尔胜出**。它告诉我们，不要用经典的“弹球”思维去想象微观粒子，量子世界的“存在”是依赖于“观测”的。

总结给你的启示：

这篇文章展示了物理学最迷人的一面——用最精密的逻辑和实验（使用了金刚石、量子随机数、相对论限制），去验证一个最哲学的问题。它告诉你，科学不仅是计算加速度和电阻，更是人类探索“世界到底是什么”的终极冒险。继续加油，物理学的深渊还有更多奇迹等着你去凝视！

第 2 页

【原文翻译】

有可能获得具有良好定义偏振的单光子 (17)。(有关技术细节请参见补充信息。)

为了满足所需的相对论分离条件，我们使用了一个 48 米长的偏振干涉仪，它具有两条空间上分离的路径（图 2）。从偏振分束器 BS_input 的本征偏振以 45° 线偏振的单

光子被分成两个分量，沿分开的路径传播。重新结合或不结合干涉仪两条路径的选择分两步完成。首先，这两束光——它们在空间上是分离的且偏振正交——通过偏振分束器 BS' 重叠，但仍然可以通过其偏振明确区分。然后，通过图 2 所示的快速电光调制器 (EOM) 以及随后的沃拉斯顿棱镜 (Wollaston prism)，做出在闭合 (closed) 或开放 (open) 两种配置之间的选择。当 EOM 未施加电压时，情况对应于移除了 BS_output：两条路径保持未结合（图 1 的开放配置）。每个探测器 D1 或 D2 随后与特定路径相关联，分别是路径 1 或路径 2。当施加 EOM 半波电压 V_{π} 时，沿不同路径传播的两束正交偏振光被沃拉斯顿棱镜重新结合。于是我们获得了图 1 的闭合干涉仪配置。

测量选择与光子通过输入分束器 BS_input 之间的类空间隔 (Space-like separation) 是通过使用自制的快速驱动器实现的，该驱动器能够在 40 ns 内在 $V = 0$ 和 $V = V_{\pi}$ 之间切换 (17)。此外，EOM 的切换是由位于干涉仪输出端附近的量子随机数发生器 (QRNG) 在距离 BS_input 48 米处实时随机决定的（见图 2）。随机数是通过对白光束的放大的散粒噪声进行采样生成的。众所周知，散粒噪声是一种内在的量子随机过程，其在给定时间的值无法预测 (23)。整个实验，从发射到探测，都通过触发单光子发射的时钟进行同步。特别是，在实验室参考系中，开放和闭合配置之间的随机选择与光子的发射是同时进行的，这确保了该测量将被应用到该光子身上。在我们的几何结构中，这意味着当光子大约处于干涉仪中间位置，即通过 BS_input 很久之后，光子才进入该随机选择的未来光锥 (future light-cone)。

单光子行为首先使用两个输出探测器进行测试，这两个探测器在移除了 BS_output 的情况下（开放配置）馈送给单次计数器和符合计数器。我们使用类似于参考文献 (2) 和 (6) 中描述的方法。我们考虑对应于 N_T 个触发脉冲施加到发射器的一轮运行，其中 N_1 （或 N_2 ）是在干涉仪路径 1 由 D1（或路径 2 由 D2）探测到的计数， N_C 是探测到的符合计数（图 2）。任何将光视为经典波的描述，如半经典理论与量子化光电探测器 (24)，都预测这些计数值应遵循以下不等式：

$$\alpha = (N_C \times N_T) / (N_1 \times N_2) \geq 1 \quad (1)$$

违反此不等式因此给出了表征非经典行为的定量标准。对于单光子波包，量子光学预测完美的反相关性，即 $\alpha = 0$ ，这与单个粒子不能同时在干涉仪的两条路径中被探测到的直观图像一致 (2)。我们测得 $\alpha = 0.12 \pm 0.01$ ，表明我们确实接近纯单光子机制。 α 参数的非理想值是由于金刚石样品的残留背景光致发光和双声子拉曼散射，这两者都会产生具有泊松统计特性的非相关光子。

利用开放配置中的单光子脉冲，我们期望每个探测器 D1 和 D2 都明确地与干涉仪的一条给定路径相关联。为了验证这一点，“路径信息 (which-way)”参数 (25, 26) $I = |(N_1 - N_2)/(N_1 + N_2)|$ 通过阻挡一条路径（例如路径 2）并测量 D1 和 D2 的计数率来评估。由于探测器的暗计数和光学元件的残留缺陷，测量得到的 I 参数值高于 0.99，但受到限制。注意，当另一条路径被阻挡（例如路径 1）时，获得相同的值。在开放配置中，我们因此拥有几乎理想的路径测量。

延迟选择实验本身是在 EOM 针对每个送入干涉仪的光子随机切换的情况下进行的，对应于开放和闭合配置之间的随机选择。两个干涉仪臂之间的相移 Φ 是通过用压电致动器 (PZT) 倾斜第二个偏振分束器 BS' 来改变的。对于每个光子，我们记录所选的配置、探测事件和 PZT 位置。所有原始数据均实时保存，仅在运行完成后才进行处理。对于每个 PZT 位置，对对应于每种配置的 D1 和 D2 上的探测事件进行分类。结果如图 3 所示。在闭合配置中，我们观察到可见度为 0.94 的干涉。偏离单位可见度归因于两束干涉光束的不完美重叠。在开放配置中，干涉完全消失，这由当相移 Φ 变化时两个输出端口没有调制所证明。我们检查了在延迟选择配置中，参数 α 和 I 保持与上述初步测试中测量的值相同。

我们对惠勒 (Wheeler) 延迟选择思想实验 (GedankenExperiment) 的实现毫无疑问地证明，光子在干涉仪中的行为取决于被测量的可观测量 (observable) 的选择，即使该选择是在光子通过类空间隔与干涉仪入口分离的位置和时间做出的。用惠勒的话来说，既然没有以小于光速的速度传播的信号能够连接这两个事件，“我们就有一种时间正常顺序的奇怪倒置。现在的我们，通过移入或移出镜子，对我们有权说是该光子已经过去的那个历史产生了不可避免的影响” (7)。再一次，我们发现大自然的行为与量子力学的预测一致，即使在那些直觉可能会动摇的令人惊讶的情况下。

【高三解读】

高中物理视角深度解读：穿越时空的“选择”？

你好，同学！今天我们要解读的是物理学史上最烧脑、最反直觉的实验之一——**惠勒延迟选择实验（Wheeler's Delayed-Choice Experiment）**的现代版验证。这张纸虽然只有短短几段话，但它讨论的问题触及了现实的本质：**过去真的已经发生并确定了吗，还是现在的观测决定了过去？**

别被那些复杂的术语吓倒，我们把它拆解成三个部分，就像在剥开一个量子洋葱。

1. 核心概念：光子的“身份危机”与“事后诸葛亮”

想象你在滑雪，面前有两条雪道（路径1和路径2）。

- 经典世界（宏观）**：你必须选择走左边或右边。不管终点有没有人看你，你走过的路是确定的。
- 量子世界（微观）**：如果你不被观测，你就像一阵雾（波），同时滑过了两条雪道。但如果你被观测，你就突然变成一个实体（粒子），只在一条道上出现。

这个实验的疯狂之处在于**“延迟选择”。科学家让光子（滑雪者）先进入干涉仪（滑雪场），等它已经滑到一半，甚至快到终点时，科学家才临时扔硬币决定**是：

- 拔掉终点的“汇合器”（Open配置）**：看你到底在哪条道上（测粒子性）。
- 装上终点的“汇合器”（Closed配置）**：让你之前的“分身”汇合产生干涉条纹（测波动性）。

结果显示：即使光子已经出发了，当我们“事后”决定测波动性时，它就表现得好像它之前同时走了两条路；当我们决定测粒子性时，它就表现得好像它之前只走了一条路。**这就好比你已经滑到了山脚，我突然决定在终点放个路障，结果你起点的历史轨迹就变了！**

2. 难点解析：如何证明这不是魔术？

为了不让大家觉得这是在变魔术，文中用了几个极其严谨的物理概念来“封死”所有漏洞：

A. 类空间隔 (Space-like Separation) —— 相对论的铁律

- **原文提到的难点：**为什么要做48米长的干涉仪？为什么要用40ns（纳秒）的快速开关？
- **解读：**这是为了防止“作弊”。根据狭义相对论，没有任何信号能超过光速。实验设计让“做决定的瞬间”和“光子进门的瞬间”离得足够远，且时间差极短。短到什么程度？短到光子进门时，**即使光速传信也无法告诉它终点的开关是怎么设置的。**这就排除了光子和开关之间“串通”的可能性，证明了这种奇怪的量子行为不是由某种隐秘的信号控制的。

B. α 参数 (The Alpha Parameter) —— 单身派对的入场券

- **公式：** $\alpha = (N_C \times N_T) / (N_1 \times N_2) \geq 1$
- **解读：**这是个用来鉴别“你是经典波还是量子粒子”的数学筛子。
 - 如果是**经典波**（像水波），它会分裂，同时触发两个探测器，所以乘积大， $\alpha \geq 1$ 。
 - 如果是**单光子**（粒子），它要么在左，要么在右，绝不可能同时触发两个探测器（反相关）。理想情况下，重合计数 N_C 是0，所以 $\alpha = 0$ 。
- **实验结果：**文中测得 $\alpha \approx 0.12$ ，远小于1。这铁板钉钉地证明了他们玩的是真正的单光子，而不是一堆光波。

3. 知识联想：这与你的高中知识有什么关系？

- **物理（光的波粒二象性）：**高中课本里讲过，光既有波动性（干涉、衍射）又有粒子性（光电效应）。这个实验告诉我们，光表现出哪种性质，**取决于你如何观测它。**更震撼的是，这种观测甚至可以“逆向”影响我们对过去路径的推断。

- **数学（不等式与反证法）**：文中提到的 $\alpha \geq 1$ 是经典物理的预测。科学家通过测量发现 $\alpha < 1$ （实际是0.12），这实际上是用**反证法**推翻了经典波动理论在单光子层面的适用性。这和贝尔不等式的逻辑很像：给出一个经典预言的界限，然后用实验打破它。
- **历史与哲学（因果律）**：惠勒（John Wheeler）是著名物理学家费曼的老师，也是“黑洞”一词的创造者。文中最后那段话非常哲学：“我们有一种时间正常顺序的奇怪倒置。”这并不是说你可以造时间机器回去杀掉祖父，而是说在量子力学中，“未被观测的过去”可能根本没有确定的物理意义。

总结一下：这张纸描述了一个顶级的物理实验，它用严密的逻辑和精密的设备（快到纳秒的开关、长达48米的光路）证明了：大自然是神秘的，观测者的选择似乎能跨越时间，定义光子的历史。这正是量子力学最迷人也最让人抓狂的地方！

第 3 页

【原文翻译】

...与相对论的冲突似乎出现了 (27)。

致谢 (Acknowledgements)

我们要热烈感谢 A. Clouqueur 和 A. Villing 实现了实验的电子学部分，感谢 J.-P. Mdrange 完成了干涉仪的所有机械实现。我们感谢 A. Browaeys 和 L. Jakubowicz 提供的持续帮助和许多充满启发的讨论。本工作由法兰西大学研究院 (Institut Universitaire de France) 资助。

参考文献与注释 (References and Notes)

1. R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. L. Sands, 《物理学讲义》 (Lectures on Physics) (Addison Wesley, 1963).
2. P. Grangier, G. Roger, A. Aspect, *Europhys. Lett.* **1**, 173 (1986).

3. F. Jelezko, A. Volkmer, I. Popa, K. K. Rebane, J. Wrachtrup, *Phys. Rev. A* **67**, 041802 (2003).
4. A. Zeilinger, G. Weihs, T. Jennewein, M. Aspelmeyer, *Nature* **433**, 237 (2005).
5. T. Aichele, U. Herzog, M. Scholtz, O. Benson, *AIP Conf. Proc.* **750**, 35 (2005).
6. V. Jacques, E. Wu, T. Toury, F. Treussart, A. Aspect, P. Grangier, J.-F. Roch, *Eur. Phys. J. D* **35**, 561-565 (2005).
7. J. A. Wheeler, pp.182-213, 收录于《量子理论与测量》(Quantum Theory and Measurement), J. A. Wheeler 和 W. H. Zurek 编辑, (Princeton University Press, 1984).
8. N. Bohr, pp.9-49, 收录于《量子理论与测量》(Quantum Theory and Measurement), J. A. Wheeler 和 W. H. Zurek 编辑, (Princeton University Press, 1984). 另见第 183 页图 4。
9. G. Greenstein 和 A. G. Zajonc, 《量子挑战》(The Quantum Challenge) (Jones and Bartlett Publishers, 1997).
10. C. O. Alley, O. G. Jakubowicz, W. C. Wickes, 收录于《第二届量子力学基础国际研讨会论文集》(Proceedings of the Second International Symposium on the Foundations of Quantum Mechanics), Tokyo (1986), H. Narani 编辑 (Physics Society of Japan, 1987).
11. T. Hellmut, H. Walther, A. G. Zajonc, W. Schleich, *Phys. Rev. A* **72**, 2533 (1987).
12. J. Balduhn, E. Mohler, W. Martienssen, *Z. Phys. B* **77**, 347 (1989).
13. B. J. Lawson Daku, R. Asimov, O. Gorceix, C. Miniatura, J. Robert, J. Baudon, *Phys. Rev. A* **54**, 5042 (1996).
14. Y.-H. Kim, R. Yu, S. P. Kulik, Y. Shih, M. O. Scully, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 001 (2000).
15. T. Kawai, T. Ebisawa, S. Tasaki, M. Hino, D. Yamazaki, T. Akiyoshi, Y. Matsumoto, N. Achiwa, Y. Otake, *Nucl. Inst. Meth. A* **410**, 259 (1998).
16. 参见例如: Focus on Single Photons on Demand (按需单光子专题), *New J. Phys.* **6** (2004).
17. A. Beveratos, R. Brouri, T. Gacoin, A. Villing, J.-P. Poizat, P. Grangier, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 187901 (2002).
18. R. Alléaume, F. Treussart, G. Messin, Y. Dumeige, J.-F. Roch, A. Beveratos, R. Brouri-Tualle, J.-P. Poizat, P. Grangier, *New J. Phys.* **6**, 92 (2004).
19. A. Beveratos, S. Kuhn, R. Brouri, T. Gacoin, J.-P. Poizat, P. Grangier, *Eur. Phys. J. D* **18**, 191 (2002).

20. A. Gruber, A. Dräbenstedt, C. Tietz, L. Fleury, J. Wrachtrup, C. von Borczyskowski, *Science* **276**, 2012 (1997).
21. C. Kurtsiefer, S. Mayer, P. Zarda, H. Weinfurter, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 290 (2000).
22. R. Brouri, A. Beveratos, J.-P. Poizat, P. Grangier, *Opt. Lett.* **25**, 1294 (2000).
23. H.-A. Bachor 和 T. C. Ralph, 《量子光学实验指南》(A Guide to Experiments in Quantum Optics) (Wiley-VCH, 2004).
24. W. E. Lamb 和 M. O. Scully, 收录于 "polarization, Matière et Rayonnement" (偏振, 物质与辐射), 纪念 A. Kastler 文集, (Presses Universitaires de France, 1969).
25. P. Grangier, 国家博士论文 (Thèse d'état) (1986), Institut d'Optique et Université Paris 11; 可在线获取: <http://tel.ccsd.cnrs.fr/tel-00009436>
26. B.-G. Englert, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 2154 (1996).
27. N. Gisin, quant-ph/0512168.

【高三解读】

你好，未来的科学家！这张看似枯燥的“参考文献页”，其实是一张通往量子力学核心秘密的“藏宝图”。它不仅仅是列书单，更是在展示人类是如何一步步把“光的波粒二象性”从哲学争论变成铁板钉钉的实验事实的。让我们像侦探一样来分析这张纸。

1. 核心概念：我们在讨论什么？

这张页面来自一篇关于**“惠勒延迟选择实验”** (Wheeler's Delayed Choice Experiment) 的顶级物理论文。虽然标题没直接写在这一页，但线索无处不在。

- **“单光子”与“干涉”**：你看第16条引用了《按需单光子专题》，第23条是《量子光学实验指南》。这说明实验是用一个个**单独的光子**（光的粒子性）去做的。
- **“波粒二象性的终极拷问”**：第7条引用了J. A. Wheeler（惠勒）的著作。惠勒提出了一个疯狂的思想实验：**如果我们发射一个光子，它在通过双缝时是“波”，但如果我们在它穿过双缝之后、打到屏幕之前，突然决定“我要看它是从哪条缝穿过的”（测粒子性），光子会怎么办？它能“回到过去”改变自己的形态吗？**
- **这篇论文做了什么**：致谢部分感谢了电子学和机械学的专家，说明这是一次**真实的物理实验**，不再是纸上谈兵。作者（包括著名的物理学家 Aspect 和 Grangier）真的造出了这种机器，验证了量子力学的奇妙特性。

2. 难点解析：隐藏的“神仙打架”

这一页列出的名字，构成了量子物理的“名人堂”。

- **Feynman (Ref 1) & Bohr (Ref 8)**：这里引用了费曼的讲义和玻尔的文章。这是在向祖师爷致敬。你在高中学的“光既是波又是粒子”，最早就是玻尔那一辈人争论出来的。但这篇论文引用他们，是为了表明：我们现在的实验结果，和他们当年的预测是吻合（或冲突）的。
- **“与相对论的冲突” (Top snippet & Ref 27)**：左上角那句残缺的话“...sion with Relativity seems to appear”非常关键。它指的是量子力学的**“非定域性”** (Non-locality)。爱因斯坦的相对论认为信息传递不能超过光速，但量子纠缠似乎暗示了一种“瞬间感应”。Ref 27 的 Nicolas Gisin 是一位专门研究量子通信的大佬，这里提到他，说明实验触及了量子力学与相对论谁对谁错的深层矛盾。
- **Aspect (Ref 2, 6)**：阿兰·阿斯佩 (Alain Aspect)，他在2022年刚刚获得了**诺贝尔物理学奖**。这里引用的是他80年代和2000年代早期的工作。这告诉你，科学研究是一个漫长的积累过程，诺奖级的成果往往在几十年前就埋下了伏笔。

3. 知识联想：从高中课本出发

- **关联“杨氏双缝干涉”**：你在物理课上学过，光通过双缝会产生明暗条纹（证明是波）。
- **关联“光电效应”**：爱因斯坦说光是一份一份的能量子（证明是粒子）。
- **进阶思考**：这篇论文的背景是把这两个实验“合二为一”。想象一下，你作为一个观察者，手里握着一个开关。当光子还在半路飞行时，你按下开关，就能决定它是像水波一样通过双缝，还是像子弹一样只通过一条缝。这篇论文告诉我们：“现实”似乎是由我们的“观测方式”决定的。

总结

这张纸不仅是枯燥的列表，它是科学大厦的“地基”。每一行引用，都代表着前人花费数年甚至一生探索出的真理。作为高三学生，你要明白：**科学创新不是凭空而来的，而是建立在对前人工作的深刻理解和精准引用之上**。当你未来写论文时，请像这些作者一样，严谨地向巨人们致敬。

【原文翻译】

图表

图 1

【图表描述】

这是一个展示惠勒延迟选择实验原理的示意图。

- **左侧输入端：**有一个“单光子脉冲（Single-photon pulse）”源。光子射向“输入分束器（BS_input）”。
- **中间路径：**光子被分为两条路径，“路径 1（Path 1）”和“路径 2（Path 2）”。每条路径上都有一个“反射镜（mirror）”将光路折向汇聚点。
- **右侧输出端：**两条路径在“输出分束器（BS_output）”处汇合。图中用虚线和实线表示该分束器是可以被移入或移出的。最后连接着两个“探测器（detectors）”。

【图注翻译】

图 1：在马赫-曾德（Mach-Zehnder）干涉仪中使用单光子脉冲进行的惠勒延迟选择思想实验（GedankenExperiment）。

干涉仪的输出分束器 BS_output 可以随意地被引入或移除（分别对应闭合或开放配置）。在开放配置中，探测器 D1 和 D2 允许人们明确地确定光子经过了哪条路径。在闭合配置中，D1 和 D2 的探测概率取决于两个干涉臂之间的相移。引入或移除 BS_output 的选择是在光子通过输入分束器 BS_input **之后**才做出的，因此进入干涉仪的光子“不可能知道”将在输出端执行哪一种互补测量（路径差测量 vs. 路径信息测量）。

图 2

【图表描述】

这是该实验的具体物理实现装置图。

1. 左侧（光源与同步）：

- **时钟 (CLOCK)**：向下方发出绿色信号控制整个系统。
- **N-V 色心 (N-V colour centre)**：接收“N_T 触发脉冲 (N_T trigger pulses)”，产生“单光子 (single photon)”。

2. 中间（干涉仪主体）：

- 光子进入蓝色方块“输入分束器 (BS_input)”。
- 分为两条红色的光路：“路径 1 (Path 1)”和“路径 2 (Path 2)”，两路径物理长度达到了 **48米 (48 m)**。

3. 右侧（控制与探测）：

- **QRNG (量子随机数发生器)**：位于右上角方框。包含一个图表，显示“随机噪声 (Random Noise, mV)”随“时间 (Time, μs)”的变化。根据噪声电平，输出控制信号 V_{EOM} ，在 V_{π} 和 0 之间切换。
- **EOM (电光调制器)**：接收 QRNG 的信号，决定是否旋转偏振。
- **光学元件**： $\lambda/2$ 波片，BS' (偏振分束器)，WP (沃拉斯顿棱镜)。
- **探测器**：N_1, N_C, N_2。

【图注翻译】

图 2：惠勒思想实验的实验实现（见图 1）。

由单个 N-V 色心发射的线偏振单光子脉冲，通过一个偏振分束器 BS_input 被送入两条在空间上分离的路径。可移动的输出分束器 BS_output 由半波片 (half-wave plate)、偏振分束器 BS'、电光调制器 EOM 和沃拉斯顿棱镜 WP 组合而成。测量配置（开放或闭合）的选择是通过向 EOM 施加给定的电压 0 或 V_{π} 来实现的。为了确保光子进入干涉仪与光子发射后的配置选择设定之间存在**类空间隔 (Space-like separation)**，特意将 BS_output 放置在距离 BS_input 48米远的地方（详见补充材料）。此外，该选择是根据量子随机数发生器 (QRNG) 的输出随机做出的，该发生器通过以单光子发射的时钟频率对来自白光束的放大散粒噪声进行采样来工作。

【高三解读】

核心概念：光子会“穿越”回去修改历史吗？

同学你好！这张图描述的是量子力学中最令人“细思极恐”的实验之一——**惠勒的延迟选择实验 (Wheeler's Delayed-Choice Experiment)**。如果不夸张地说，这个实验挑战了我们对“时间”和“因果律”的传统认知。

简单来说，这个实验在问：**微观粒子的行为（是变成波还是变成粒子），是由它出发时的状态决定的，还是由它到达终点时我们的观测方式决定的？**

这就好比你去餐厅点菜（光子出发）。正常逻辑是：你点了什么，厨房就做什么，最后你吃到什么。但这个实验暗示：**你最后决定用什么餐具（比如用勺子还是用筷子），竟然决定了厨房在一小时前到底做了汤还是米饭！**

难点解析：这一页到底在讲什么？

为了让你彻底读懂这张图，我们需要拆解三个关键点：

1. “波粒二象性”的开关（图 1 的核心）

- **背景**：你在物理课学过，光既有**粒子性**（像子弹一样走直线），又有**波动性**（会发生干涉）。
- **实验设定**：
 - **开放配置（移除 BS_output）**：光子要么走上路（Path 2），要么走下路（Path 1）。探测器响了，我们就知道它走了哪条路。这时光表现为**粒子**。
 - **闭合配置（放入 BS_output）**：两条路的光汇合。就像双缝干涉一样，两条路径的“波”会发生干涉。这时我们无法知道它走了哪条路，光表现为**波**。
- **惠勒的追问**：如果在光子已经通过了第一道门（BS_input），正在半路上飞的时候，我们才突然决定是否要把终点的那扇门（BS_output）关上，光子该怎么办？它怎么知道该按“粒子”跑还是按“波”跑？

2. 为什么要相隔 48 米？（图 2 的核心）

这是为了制造物理学上的**“类空间隔 (Space-like separation)”**，这是理解本图最硬核的地方。

- **逻辑链条**：光跑得很快 ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)。如果装置太小，光子瞬间就飞完了，你还没来得及做决定（切换 EOM 电压）。
- **操作**：科学家把路程拉长到 **48米**。光跑完这段路大约需要 160纳秒 ($t = s/v$)。
- **目的**：这 160纳秒就是科学家争取的“作弊时间”。在这极短的时间窗口内，光子还在半路上，系统利用 **QRNG（随机数发生器）** 迅速抛个硬币，决定终点是“测粒子”还是“测波”。这样就确保了：**光子出发时，绝对不可能预知终点的测量方式。**

3. 那个 QRNG 图表在干什么？

- 图 2 右上角的波形图展示了决策过程。它利用“噪声”这种完全随机的物理现象来产生 0 或 1。这确保了我们的选择是**真随机**的，而不是某种预设的程序，排除了“光子可能看穿了程序规律”这种解释。

知识联想：连接你的高中知识库

1. 物理 - 光学与波：

- 回顾**杨氏双缝干涉**。当你有两个缝（两条路）且不观测时，发生干涉（明暗条纹）；一旦你试图探测光子穿过哪个缝，干涉条纹消失。本实验就是双缝干涉的“超级升级版”。
- 回顾**偏振（Polarization）**：图 2 中用到了 $\lambda/2$ 波片和偏振分束器，这利用了光的横波性质来控制光路开关。

2. 物理 - 狭义相对论：

- **光速不变原理**：实验设计的基石是光速有限。如果光速无限，我们就无法在它飞行途中做手脚了。
- **因果律**：通常因（Input）在先，果（Output）在后。但量子力学似乎暗示，现在的测量（果）定义了过去性质（因）。

3. 数学 - 概率与逻辑：

- 在这个实验中，我们不再讨论确定的轨迹，而是讨论**概率幅**的叠加。这实际上是将数学中的复数运算应用到了物理实体上。

总结给你的话：

这项实验告诉我们，微观世界的法则与我们宏观的直觉截然不同。当你看着图 2 那个复杂的装置时，别被线路吓倒，它只是在拼命争取那几百纳秒的时间，试图“欺骗”一个光子。结果光子赢了——它似乎总是能完美地配合我们的选择，哪怕那个选择是在

它出发之后才做出的。这就是物理学的迷人之处：它不断打破你的常识，带你窥探宇宙最底层的代码。加油，未来的物理学家！

第 5 页

【原文翻译】

图表数据可视化描述

图 (a)：干涉模式

该图显示了两个探测器（D1-蓝色，D2-红色）的计数随相移 Φ 的变化。呈现出明显的正弦振荡波形。

相移 Φ (rad)	D1 计数 (蓝色)	D2 计数 (红色)	趋势描述
~ 0	~ 300	~ 1300	D1 波谷，D2 波峰
$\sim \pi$	~ 1300	~ 300	D1 波峰，D2 波谷
$\sim 2\pi$	~ 300	~ 1300	D1 波谷，D2 波峰
...	此消彼长，周期性变化

图 (b)：非干涉模式

该图显示了在相同相移范围内，探测器的计数基本保持恒定，没有明显的振荡。

相移 Φ (rad)	D1 计数 (蓝色)	D2 计数 (红色)	趋势描述
0 到 10π	$\sim 600-700$	$\sim 600-700$	两者重叠，呈平直线，伴有随机噪声

图 3：延迟选择实验的结果。

相移 Φ （以任意原点表示）是通过倾斜 BS' 来改变的。每一个记录点对应 1.9 s 的采集时间，大约检测到 2600 个光子。探测器的暗计数（D1 为 59 s^{-1} [蓝点] 和 D2 为 70 s^{-1} [红点]）已从数据中扣除。

(a) 当 V_{π} 电压施加在 EOM 上时的情况（闭合配置）；获得了 94% 可见度的干涉条纹。

(b) 当 EOM 上未施加电压时的情况（开放配置）；未观察到干涉，并且在两个输出口测量到相等的探测概率 (0.50 ± 0.01)，这对应于由“路径信息”(I 参数大于 99%) 导致的干涉消失。

5

【高三解读】

核心概念：量子世界的“变脸”游戏——波还是粒子？

这一页展示的是大名鼎鼎的**“延迟选择实验”**的核心证据。这就好比你在看一场魔术，魔术师让你在“波”和“粒子”两种现实之间进行选择。

通俗地说，这个实验是在问光子一个问题：“你到底是像水波一样同时走两条路（波动性），还是像子弹一样只走一条路（粒子性）？”

- **图 (a) 代表“波的现实”**：当你看到那两条漂亮的红色和蓝色正弦曲线交替起伏时，这就是**干涉现象**。就像两块石子投入水中，涟漪互相叠加，有的地方增强（波峰），有的地方抵消（波谷）。这意味着光子“不知道”自己走哪条路，它表现出波动性。红蓝曲线的一高一低（反相），说明能量是守恒的，光子要么去D1，要么去D2，概率随相位周期性变化。
- **图 (b) 代表“粒子的现实”**：看那两条平平的线，无论相位怎么变，计数都稳定在中间（大约600-700）。这意味着干涉消失了！光子表现得像普通的弹珠，有50%的概率去D1，50%的概率去D2。为什么？因为在这种情况下，我们（在理论上）能知道光子走了哪条路，这种“路径信息”的存在瞬间杀死了波动性。

难点深度解析：为什么加个电压就能改变现实？

这里有几个高三物理延伸出的硬核概念，我们来拆解一下：

1. V_{π} 与 EOM（电光调制器）：

你可以把 EOM 想象成一个极高速度的“量子开关”。

- 在图 (a) 中，施加了 V_{π} 电压。这个电压的作用相当于把实验装置的“后门”关上了（Closed configuration），抹去了光子走过路径的标记。因为我们无法区分路径，光子就只能“同时”走两条路，于是**干涉（Interference）**复活了，这就是那条正弦波。
- 在图 (b) 中，**没有电压**。这时装置处于“开放”（Open configuration）状态。光子的路径信息被保留了下来（Which-way information）。量子力学告诉我们：**一旦你能知道粒子在哪，它就不再像波一样弥散**。所以干涉条纹瞬间“洗白”（Washing-out），变成了无聊的直线。

2. 可见度 (Visibility) 94%：

这是衡量干涉条纹清晰度的指标。公式是 $V = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$ 。94% 是一个非常高的数值，说明实验精度极高，环境噪声（如震动、温度）控制得非常好，证明了波动性的存在是铁板钉钉的。

3. 暗计数 (Dark counts)：

译文中提到减去了“ 59 s^{-1} ”等数值。这就像你闭着眼睛有时候也能看到光斑一样，探测器在没有光的时候也会因为热运动产生电子信号。为了数据的严谨性，必须把这些“背景噪音”减掉，才能看到真实的量子行为。

知识联想：从高中物理到哲学思考

• 关联高中物理：

这其实是**杨氏双缝干涉实验**的超级升级版。在高中物理课本里，光通过双缝会产生明暗条纹（像图 a）。但如果你在双缝旁边装一个摄像头去监视光子走哪条缝，干涉条纹就会消失，变成两条亮纹（对应图 b 的平线）。本实验用精密的光学器件（BS, EOM）代替了简单的狭缝，但物理本质是一样的：**观测行为（或观测的可能性）决定了物质的状态**。

• 数学直觉：

图 (a) 的曲线正是你们熟悉的三角函数 $y = A \sin(\omega x + \varphi) + k$ 。红蓝两条线的相位差是 π （180度），所以一条是 \sin ，另一条就是 $-\sin$ 。这完美体现了概

率的归一化：不管相位怎么变，红点+蓝点的总数在大致上是恒定的（遵循能量守恒）。

- **哲学意味：**

这个实验最让人细思极恐的地方在于“延迟选择”。EOM 的开关可以在光子几乎已经走完路程的最后时刻才决定是否加电压。这意味着，我们在“现在”做的决定，似乎决定了光子在“过去”是表现为波还是粒子。这挑战了我们要么是波、要么是粒子的传统实在论观点，展示了微观世界反直觉的奇妙逻辑。

第 6 页

【原文翻译】

方法

触发式单光子源

我们在金刚石纳米晶体中使用单个氮-空位 (N-V) 色心。这些 N-V 色心是通过用高能电子辐照 Ib 型金刚石样品，随后在 800°C 下退火产生的¹。在控制良好的辐照剂量下，N-V 色心的密度足够小，从而允许使用标准的共聚焦显微镜独立寻址单个色心²。用于激发和光谱表征单个色心光致发光的实验装置如图 4 所示。

图 4：图表说明

(a) 结构示意图

- 图中展示了金刚石晶格结构，标记了 C（碳原子）、N（氮原子）和 V（空位）。

(b) 实验装置示意图

- 光源：脉冲激发， $\lambda=532\text{ nm}$

- **光路组件：**扫描镜 (scanning mirror)、二向色镜 (dichroic mirror)、显微物镜、金刚石样品 (diamond sample)、滤光片 (filter)、针孔 (pinhole)。
- **探测模块：**
 - **$g^{(2)}(\tau)$ 测量：**光路分为两束进入 HBT 装置（图中标记为 Interferometer/干涉仪位置，实际为强度关联测量）。
 - **光谱仪 (Spectrometer)：**用于测量发射光谱。

(c) $g^{(2)}(\tau)$ 测量图表

- **Y轴：**归一化 $g^{(2)}(\tau)$ (Normalized $g^{(2)}(\tau)$)
- **X轴：**延迟 τ (ns) (Delay τ (ns))
- **数据描述：**在 -200, 0, 200 ns 处有峰值/谷值。零延迟 ($\tau=0$) 处出现明显的凹陷（反聚束效应），数值接近 0。

(d) 光谱图表

- **Y轴：**计数 (Counts)
- **X轴：**波长 (nm) (Wavelength (nm))
- **数据描述：**
 - 蓝色曲线 (1) 和 (2)：尖锐的拉曼散射峰。
 - 红色曲线：N-V 色心的宽发射谱，峰值约在 650-700 nm 之间，并在 637 nm 处有特征性的零声子线 (ZPL)。

图 4 图注翻译：

(a) N-V 色心由一个取代氮原子 (N) 和一个位于金刚石晶体基质相邻晶格位点的空位 (V) 组成。

(b) 共聚焦显微镜装置。532 nm 脉冲激发激光束通过高数值孔径 (NA=0.95) 的显微物镜紧密聚焦在金刚石纳米晶体上。N-V 色心的光致发光由同一物镜收集，然后进行光谱过滤以去除残留的泵浦光。遵循标准的共聚焦检测方案，收集到的光被聚焦到一个 100 μm 直径的针孔上。为了识别隔离良好的光致发光发射体，样品首先进行光栅扫描。对于实验中使用的色心，实现了约 10 的信噪比（信号背景比）。

(c) 发射体的唯一性随后通过观察标准汉伯里-布朗和特维斯 (Hanbury Brown and Twiss) 装置记录的 N-V 色心光致发光的二阶关联函数 $g^{(2)}(\tau)$ 中的反聚束效应来确保。零延迟处非常小的残留值 $g^{(2)}(0) = 0.12$ 是由于样品中色心所在位置的背景发射造成的。 $g^{(2)}(\tau)$ （蓝线）的指数拟合给出了缺陷的激发态寿命 $T_{sp} = 44.5 \pm 0.5$ ns。

(d) 光致发光的一部分也可用于记录 N-V 色心的发射光谱。两条尖锐的谱线 (1) 和 (2) 分别是与激发波长相关的金刚石基质的双声子拉曼散射线，以及位于 637 nm 处表征带负电 N-V 色心光致发光的零声子线。

正文续：

激发是通过波长为 532 nm 的自制脉冲激光器完成的³。激光系统提供 800 ps 的脉冲，能量为 50 pJ，足以确保将色心有效地泵浦到其激发态。与稳定的外部时钟同步的重复频率设置为 4.2 MHz，以便连续的荧光衰减在时间上彼此很好地分开。因此，单光子由 N-V 色心在预定时间发射，其精度在这个实验中使用的色心的激发态寿命范围内（约为 45 ns，见图 4(c)）。

参考文献：

1. C. Kurtseifer, S. Mayer, P. Zarda, and H. Weinfurter, Phys. Rev. Lett. 85, 290 (2000).
2. A. Gruber, A. Dräbenstedt, C. Tietz, L. Fleury, J. Wrachtrup, and C. von Borczyskowski, Science 276, 2012 (1997)
3. A. Beveratos, S. Kuhn, R. Brouri, T. Gacoin, J.-P. Poizat, and P. Grangier, Eur. Phys. J. D 18, 191 (2002).

【高三解读】

核心概念：打造一把“量子机关枪”

想象一下，如果你想制造一把枪，这把枪非常特殊：**每次扣动扳机，它绝对只发射一颗子弹，不多也不少**。在量子物理的世界里，这颗“子弹”就是光子（光的基本粒子）。

本页内容就是在教我们如何制造这样一把“**触发式单光子源**（Triggered single-photon source）”。

这把“枪”的构造核心是：

1. **子弹工厂（N-V色心）**：科学家在金刚石（钻石）的完美碳原子晶格中故意制造了一种“缺陷”，把一个碳原子换成氮原子（N），并把旁边挖个坑（空位 V）。这个组合叫“氮-空位色心”，它就像一个微型灯泡，被激发后能发光。

2. **瞄准镜（共聚焦显微镜）**：因为这个“灯泡”太小了（原子级别），我们需要用超级显微镜精准地找到它，并排除周围杂光的干扰。
3. **扳机（脉冲激光）**：用一束绿色的激光（532 nm）去“踢”这个电子一下，让它跳到高能级，等它掉下来时，就会吐出一颗光子。

💡 难点解析：如何证明它是“单发”的？

这一页最难懂但也最精彩的部分在于图 4(c) 和那个神秘的公式 $g^{(2)}(\tau)$ 。

1. 什么是 $g^{(2)}(\tau)$ ？（二阶关联函数）

这就好比你在一个路口装了两个计数器（HBT装置），用来统计车流。

- 如果车流是连绵不断的（普通激光），两个计数器会同时响。
- 如果车是一辆接一辆严格分开通过的（单光子源），那么在同一瞬间，车子要么在左边，要么在右边，绝不可能同时撞上两个计数器。

图 4(c) 的“深坑”：

请看图(c) 中间那个深深的凹陷（Delay $\tau = 0$ 处）。纵坐标归一化后接近 0（实际是 0.12），这意味着**“零延迟”时刻的巧合概率几乎为零**。

翻译成成人话就是：**这个光源绝不会同时发射两个光子**。这就是著名的“反聚束效应（Antibunching）”，它是量子光的铁证。

2. 图 4(d) 的光谱是什么意思？

这就像是给光做“指纹识别”。

- 图中的红线大鼓包是 N-V 色心发出的光。
- 那个标着 (1) 和 (2) 的蓝色尖峰是金刚石本身骨架震动产生的“杂音”（拉曼散射）。
- 最关键的是 **637 nm 处的那个小尖峰（零声子线）**，这是 N-V 色心的“身份证”，证明发光的确实是我们想要的那个量子缺陷，而不是别的脏东西。

3. 为什么要有“针孔 (Pinhole)”?

在图 4(b) 的装置图中，针孔起到了“空间过滤器”的作用。你可以把它想象成**摄影师的去背景功能**。它只让聚焦点那一个极小点（N-V色心）发出的光通过，而把聚焦点前后左右的背景杂光全部挡住。没有这个，信号就会被淹没在背景噪声里。

知识联想：高中物理的进阶版

作为高三学生，你可以把这些知识点与你的课本联系起来：

1. 波尔原子模型与能级跃迁（物理选修）：

文中提到的“激发态寿命（Excited state lifetime）”约为 45 ns。这对应高中物理中电子从高能级跃迁回基态的过程。激光给电子能量（吸收），电子跳回去时放出光子（辐射）。这里的 45 ns 就是电子在高能级上平均“待”的时间，这直接决定了我们这把“枪”的最高射速（也就是文中提到的 4.2 MHz 重复频率）。

2. 光的波粒二象性：

普通的光（如阳光、灯光）我们主要研究它的**波动性**（干涉、衍射）。而这个实验研究的是光的**粒子性**——把光看作一颗颗独立的子弹。 $g^{(2)}(\tau)$ 实验就是证明光具有粒子性的最硬核实验之一。

3. 未来的应用——量子密码：

为什么要费这么大劲造单光子源？因为在**量子密钥分发（BB84协议）**中，如果我发送的是真正的单光子，窃听者就无法在不破坏光子的情况下截获信息（因为光子不能被劈开，也不能被完美克隆）。这是未来绝对安全的量子通信的基石。

总结：这一页纸展示了如何利用钻石中的一个原子级缺陷，配合精密的激光和显微技术，制造出一个完美的量子比特发射器。这是通往量子计算机和量子互联网的底层硬件基础。

【原文翻译】

由于块状材料的高折射率 ($n = 2.4$)，金刚石中缺陷的光致发光存在一个显著的限制，这使得有效提取发射出的光子变得困难。样品界面处的折射导致了较小的收集效率，这主要受限于全内反射和强光学像差。解决这些问题的一个有效方法是考虑金刚石纳米晶体中缺陷的发射，因为这些晶体的尺寸远小于辐射光的波长。纳米晶体的亚波长尺寸使得折射效应变得无关紧要，人们可以简单地将色心视为在空气中辐射的点光源。此外，由泵浦激光激发的金刚石体积很小，产生的背景光非常低。这一特性对于单光子发射至关重要，因为残留的背景光会导致在发射的光脉冲内出现一个以上光子的非零概率。

纳米结构样品的制备始于 Ib 型合成金刚石粉末 (ElementSix, 荷兰)^{3,4}。经过辐照后，金刚石纳米晶体被分散到聚合物溶液中，然后通过离心进行尺寸筛选，平均直径约为 90 nm。含有筛选后的金刚石纳米晶体的所得聚合物溶液被旋涂到介电镜的表面，形成一个 30 nm 厚的聚合物层，随后的金刚石纳米晶体即被保持在该层中。该镜面 (Layertec, 德国) 的超低荧光介电结构经过优化，可将 N-V 色心的光致发光有效地反射向收集光学器件。我们注意到，来自镜面介电层的背景荧光在样品被照射几小时后由于光漂白作用而强烈减少，而 N-V 色心的发射特性则保持不受影响。

具有两条空间分离路径的单光子干涉仪

该实验基于文章中描述的一个 48 米长的干涉仪，其配置非常接近马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder) 干涉仪。线偏振单光子脉冲被发送通过第一个 YVO₄ 偏振分束器 (BS_{input})，该分束器具有 45° 取向的偏振本征态。 BS_{input} 输出端的 S 和 P 两个线偏振随后在空间上被分离 4 mm，足以避免两束光之间的任何重叠，因为光束大小约为 1 mm。为了限制沿干涉仪露天传播造成的衍射效应，使用了两个放大倍率为 $\times 5$ 的无焦系统。经过 48 m 的传播 (相当于飞行时间 $\tau_{interf} \approx 160$ ns) 后，第二个偏振分束器 (BS') 在不重新结合干涉仪的两条正交偏振路径的情况下，将两个空间分离的偏振通道重叠。在 BS' 的输出端，两个重叠的偏振通道通过一个 KDP 电光调制器 (EOM, Linos LM0202, 德国) 和一个将 S 和 P 偏振分离的沃拉斯顿棱镜

(Wollaston prism)。最后，两个工作在光子计数模式下的硅雪崩光电二极管（APD）（Perkin Elmer AQR14）被放置在输出端口。根据施加在 EOM 上的电压（ $V = 0$ 或 $V = V_{\pi}$ ），干涉仪处于图 5 所示的*闭合*或*开放*状态。

图 5：根据施加在 EOM 上的电压，第二个偏振分束器 BS' 之后的偏振状态。

EOM 电压	BS' 输出端的偏振状态	EOM 输出端的偏振状态	沃拉斯顿棱镜输出
$V = 0$	分离态 (垂直与水平偏振未混合)	保持原样 (偏振方向未改变)	路径确 (D1 接收垂直 接收水平分量。
$V = V_{\pi}$	分离态 (垂直与水平偏振未混合)	旋转 45° (EOM 旋转光轴， 改变偏振态)	混合/干 (偏振态投影到 产生干涉条

图 5 图注： 当未施加电压时，两个偏振保持未重新结合状态，干涉仪是开放的。探测器 D1 和 D2 各自关联到光子沿干涉仪的一条路径，提供了“哪条路径（which-path）”信息。当 V_{π} 电压施加到 EOM 时，其光学本征态相对于输入偏振方向呈 45°，EOM 相当于一个半波片，将偏振态旋转 45°。随后，当通过倾斜 BS' 改变两个干涉通道之间的光程差时，沃拉斯顿棱镜将两个偏振混合，干涉现象便出现在两个互补的输出端口。

⁴A. Beveratos, R. Brouri, T. Gacoin, J.-P. Poizat, and P. Grangier, Phys. Rev. A 64, 061802R (2001).

【高三解读】

高三物理视角的深度解读：从“越狱”的光子到量子擦除实验

你好！这一页内容非常硬核，它不仅涉及到了**光学**的前沿应用，还触及了**量子力学**中最核心、最迷人的本质——波粒二象性。别被这些术语吓到，我们把它拆解成三个部分，就像在读一个侦探故事。

1. 核心概念：本页讲了什么？

简单来说，这篇文章在讲两件事：

- 怎么制造完美的“子弹”**：科学家想用金刚石里的缺陷（N-V色心）来发射**单光子**（一次只发一颗光子）。但大块金刚石像个“牢笼”，光很难跑出来。于是他们把金刚石磨成了纳米级的粉末，让光子能轻松逃逸。
- 怎么用这些“子弹”做量子实验**：他们搭建了一个长达48米的“跑道”（干涉仪），让光子在里面跑。最精彩的是，他们在终点前装了一个“开关”（EOM），这个开关决定了我们是看到光子的“粒子性”（知道它走了哪条路），还是看到“波动性”（产生干涉条纹）。

2. 难点解析：不仅要懂，还要透

难点一：为什么要把金刚石磨成粉？（全内反射与折射率）

- 原文背景**：文中提到金刚石折射率 $n = 2.4$ ，这导致光很难出来。
- 高中知识链接**：还记得物理课学的**全内反射**吗？根据斯涅尔定律（Snell's Law），光从光密介质（大 n ）射向光疏介质（小 n ，空气 $n \approx 1$ ）时，如果入射角大于临界角 C （ $\sin C = 1/n$ ），光就会被完全反射回去。
- 深度解读**：金刚石的 n 太大了，算一下临界角 $\sin C = 1/2.4 \approx 0.41$ ，即 $C \approx 24^\circ$ 。这意味着只要光线稍微斜一点，就被困死在金刚石内部出不来了（这也是钻石为什么看起来很闪的原因，光在里面乱窜）。

- **解决方案：**科学家用了“纳米晶体”(90 nm)。这个尺寸远小于光的波长（可见光几百纳米）。在这个尺度下，宏观的折射定律失效了，晶体变成了一个“点光源”，光子不再受全内反射的束缚，可以向四面八方辐射。这就好比把监狱的墙拆了，犯人（光子）想走就走。

难点二：48米长的干涉仪与“哪条路径”信息

- **实验装置：**这是一个变形的马赫-曾德尔干涉仪。
 - 光子遇到第一个分束器 (BS)，变成了“既走S路又走P路”的叠加态。
 - 两条路分开跑了48米（为了让飞行时间够长，达到160纳秒，方便电子设备响应）。
- **关键角色 EOM（电光调制器）：**这是整个实验的“灵魂”。
 - **情况 A：开关闭闭 ($V = 0$) -> 粒子性：**

看图5的第一行。S偏振（竖直）和P偏振（水平）一直保持正交。最后的棱镜（Wollaston）就像一个只认方向的安检员：竖直的去D1，水平的去D2。如果你在D1探测到光子，你就**百分之百确定**它走的是S路径。因为有了“路径信息”，干涉消失了。
 - **情况 B：开关打开 ($V = V_{\pi}$) -> 波动性：**

看图5的第二行。EOM加了电压，像一个半波片，把偏振方向旋转了45°。原本的“纯竖直”和“纯水平”现在都变成了“斜着”的。这下麻烦了，最后的棱镜分不清谁是谁，因为两个路径的光现在都混在了一起。一旦无法区分路径，**干涉**就出现了！

这实际上演示了量子力学中著名的***“量子擦除”***（Quantum Eraser）概念：当你擦除“路径信息”时，干涉条纹就会复活。

3. 知识联想：搭建你的知识体系

- **物理（光学）：**
 - **杨氏双缝干涉：**这是高中物理的经典。这篇论文里的实验其实就是“高配版”的双缝干涉。S和P两个偏振态就是“双缝”。如果我们在双缝上贴上标签（标记偏振），干涉就消失；如果我们撕掉标签（旋转偏振混合），干涉就回来。

- **波长与尺寸**：文中提到纳米晶体尺寸（90 nm）远小于波长。这提醒我们要有尺度的概念。当障碍物尺寸 \ll 波长时，发生的是瑞利散射（也就是天空为什么是蓝的原理），而不是简单的折射。
- **数学（几何）**：
 - **向量投影**：图5中旋转45°的操作，在数学上就是坐标系的旋转。原来的向量 $(0, 1)$ 和 $(1, 0)$ 被旋转后，在新的坐标轴（棱镜的轴）上都有了投影分量。正是因为都有分量，二者才能叠加（相加），这就是干涉的数学本质。
- **思维拓展**：
 - 这个实验告诉我们，“**观察**”这个动作会改变现实。在量子世界里，是否获取信息（知道光子走哪条路）直接决定了物质表现为粒子还是波。这不仅是物理问题，甚至带有一点哲学的味道。

总结：这一页展示了科学家如何克服材料的物理限制（利用纳米技术），搭建精巧的舞台（干涉仪），来为我们上演一场微观世界最神奇的“魔术”——通过控制信息的获取，来控制现实的呈现。

第 8 页

【原文翻译】

最后，N-V色心的光致发光经过中心波长为670 nm、半峰全宽（FWHM）为10 nm的光谱滤波，以避免无焦系统的色差问题，并防止因N-V色心宽带发射导致的干涉可见度降低（见图4-(d)）。最终，在开放配置下，每个探测器上测得的计数率约为 $700 \text{ count}\cdot\text{s}^{-1}$ 。相应的信噪比约为10，主要受限于两个雪崩光电二极管（APD）的暗计数，每个APD的暗计数约为 $60 \text{ count}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

量子随机数发生器 (Quantum Random Number Generator)

为了确保光子进入干涉仪与执行测量的选择之间存在类空分隔 (space-like separation)，施加在电光调制器 (EOM) 上的电压是在干涉仪输出端由一个量子随机数发生器 (QRNG) 实时随机选择的。随机数是从一束白光被放大后的散粒噪声 (shot noise) 中产生的。对于每一个时钟脉冲，即每 238 ns，将放大的散粒噪声与零电平进行快速比较，生成二进制随机数0或1。如图6所示，在与实验相关的时间尺度上，随机数序列的自相关函数显示不同的抽取之间没有显著的相关性。我们还通过每 10 ns 对放大的散粒噪声进行直接采样，检查了其相关时间大约为 60 ns。这一测量证实了在 4.2 MHz 时钟速率下所做的选择是不相关的。

图表描述 (图 6):

该图展示了“随机数自相关函数”(Random number autocorrelation)。

- **Y轴**：自相关值，范围从 0.0 到 1.0。
- **主图 X轴**：时间 (Time)，单位为毫秒 (ms)，范围从 -20 到 100。曲线显示在整个毫秒级范围内，数值稳定在 0.0 附近 (红线)，表明长并未见相关性。
- **插图 (Insert) X轴**：时间 (Time)，单位为微秒 (μs)，范围从 -5 到 5。插图显示了零延迟附近的细节。在 0 μs 处有一个尖锐的红色峰值达到 1.0 (完全自相关)，而在峰值两侧立即降至 0.0 附近，表明极短时间内的相关性迅速消失。

图 6 图注：以 4.2 MHz 时钟频率生成的 420,000 个随机数序列的归一化自相关函数。插图展示了接近零延迟的函数放大图。在长时间尺度上未观察到相关性。在非常短的时间尺度 (低于 1 μs) 上出现了约 4% 的小幅反相关效应，推测是由于散粒噪声受限光电探测器的放大输出中存在微小振荡所致。

实验的时序 (Timing of the experiment)

一小部分 532 nm 脉冲泵浦激光用于以 4.2 MHz 的重复率触发实验时钟，对应于每 $\tau_{\text{rep}} = 238 \text{ ns}$ ⁵ 激发一次色心。如图7所示，一个FPGA可编程电路为每个时钟脉冲生成以下序列。首先，将放大的散粒噪声与零电平进行快速比较，生成一个二进制随机数0或1，该随机数驱动施加到EOM上的电压，在“开”和“关”配置之间切换。然后，调整一个持续时间为 $\tau_{\text{d}} = 40 \text{ ns}$ 的探测门，并设置适当的时间延迟以与光子到达探测器 D1 和 D2 的时间重合⁶。FPGA电子器件经过编程，使得随机数的产生是在探测门之前 160 ns 完成的，这对应于光子在干涉仪内部的飞行时间 τ_{interf} 。因此，QRNG是在光子发射的同时（在N-V色心激发能级寿命 $\tau_{\text{sp}} = 44.5 \pm 0.5 \text{ ns}$ 的精度范围内）运行的（见图4-(b)）。

⁵ 由于光子在干涉仪中的飞行时间 τ_{interf} 小于激发周期 τ_{rep} ，因此干涉仪内任何时刻只有一个单光子脉冲。

⁶ 这种门控探测导致 D1 和 D2 的暗计数有效数量显著减少。

【高三解读】

核心概念：量子实验的“裁判”与“指挥棒”

这页内容主要描述了一个高精度的量子光学实验（很可能是验证量子力学基础问题的实验，如延迟选择实验或贝尔不等式检验）中的两个关键技术环节：**如何生成绝对公平的随机数**以及**如何精准控制实验的时间节奏**。

你可以把这个实验想象成一场极其严谨的“猜硬币”游戏，光子是硬币，而这页纸在讲如何确保抛硬币的过程没作弊，以及裁判按表计时的精度达到了纳秒级。

1. 真正的“上帝掷骰子”：量子随机数发生器 (QRNG)

- **为什么要这么做？** 在普通的电脑程序里，`random()` 函数生成的其实是“伪随机数”，它们是由算法算出来的，理论上可以被预测。但在量子力学实验中，如果随机数可以被预测，那就存在“作弊”的漏洞 (Loophole)。
- **怎么做？** 科学家没有用代码，而是利用了物理现象——**散粒噪声 (Shot Noise)**。想象下雨天雨点打在屋顶上的声音，那是杂乱无章的。文中利用白光的“光子雨”打在探测器上的微小涨落，将其放大后通过比较电压高低来决定是“0”还是“1”。这是基于量子物理本质的真随机。
- **图6解读：**那个红色的图表是在自检。“自相关函数”是用来检测“现在的随机结果”和“过去的随机结果”有没有关系。图上除了 0 时刻（自己跟自己比）有一个尖峰外，其他地方都是平的（接近0），这说明：**每一次抛硬币的结果都与上一次完全无关**，是完美的独立随机事件。

2. 严苛的“时空法则”：类空分隔 (Space-like Separation)

- **难点解析：**这是一个源自狭义相对论的概念。文中提到要确保“光子进入干涉仪”和“QRNG做选择”之间有**类空分隔**。意思就是：这两个事件发生得太快、距离太远，以至于光都来不及在它们之间传递信息。
- **目的：**这是为了防止“因果性”作祟。如果QRNG的选择能通过某种信号（即使是光速）传给光子，光子可能会“提前商量好”怎么表现。通过让QRNG在光子飞行途中（且光子还没到达探测器前）极速做出决定，科学家就能保证光子在进入迷宫前绝对不知道迷宫的开关会怎么变。

3. 精密的“交响乐指挥”：实验时序

- **纳秒级操作：**文中出现了很多时间单位： τ_{rep} (238 ns)、 τ_{d} (40 ns)、 τ_{sp} (44.5 ns)。
 - **238 ns** (纳秒)：这是心跳节奏，每秒跳 420 万次 (4.2 MHz)。
 - **FPGA**：这是一种可编程的高速芯片，它是“指挥官”。它要在光子飞行的极短瞬间内，完成“生成随机数 -> 切换开关电压”的一系列动作。
- **门控探测 (Gated Detection)：**为了看清微弱的信号（光子），探测器只在光子可能到达的那 40 ns 的窗口期打开“眼睛”。这就像为了拍清楚闪电，只在闪电亮起

的那一瞬间按下快门，这样照片上就不会有其他的噪点（暗计数）。

知识联想：高中物理的进阶版

1. **光电效应与噪声**：高中物理学过光电效应，光是粒子。文中的“散粒噪声”正是因为光是由一颗颗离散的光子组成的，到达探测器的数量会有统计涨落，这直接证明了光的粒子性。
2. **狭义相对论**：文中提到的“类空分隔”直接对应爱因斯坦的光速不变原理。没有任何信息传播速度能超过光速 c 。如果 $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 < 0$ ，两件事就不可能有因果联系。
3. **概率与统计**：图6中的“自相关函数”其实就是数学中统计独立性的可视化。如果事件A和事件B独立，那么 $P(AB) = P(A)P(B)$ ，体现在图上就是相关系数为0。

总结：这一页展示了现代物理实验的极致——为了问大自然一个简单的问题（量子力学是对的吗？），科学家必须在纳秒的时间尺度上，用光速赛跑，利用量子本身的随机性来验证量子理论，充满了逻辑的闭环之美。

第 9 页

【原文翻译】

如图7的时空图所示，如果单光子出现在其时间发射窗口的最开始（或最末尾），它已经在干涉仪内部停留了 85 ns（或 40 ns），这意味着它距离输入分束器（BS_input）25 m（或 12 m）。此外，这种时序确保了“光子进入干涉仪（在 BS_input 处）”与“在 BS_output 处选择实验配置”这两个事件在狭义相对论意义上是类空分离（space-like separated）的，正如惠勒（Wheeler）的提议所要求的那样。确实，光子进入了随机选择事件的未来光锥，而此时光子大约位于干涉仪的中部，远在通过 BS_input 之后。

图表内容说明

图表标题：时空图解 (Space-time diagram)

坐标轴：

- **横轴**：时间 Time (ns)，刻度从 0 到 600。
- **纵轴**：空间位置/组件 (示意)，包含 Input (输入)、Output (输出)。

图注标签与波形：

1. 顶部标注：

- 单光子发射 (single-photon emission)：对应红色虚线区间。
- τ_{sp} ：单光子发射持续时间。
- T_{rep} ：重复周期。
- T_{interf} ：干涉仪内的飞行时间。

2. 主要区域：

- **红色斜带**：代表光子路径 (Input 和 Output)。
- **蓝色三角形区域**：类空区域 (Space-like region)。这是核心区域，表示在此范围内发生的事件无法进行因果通讯。
- **绿色曲线**：时钟信号 (Clock "n-1", Clock "n", Clock "n+1")。
- **红色方波线**：EOM (电光调制器) 电压信号。

3. 关键事件点：

- **QRNG**：量子随机数发生器，位于蓝色虚线处。
- **Choice for photon "n"** (光子 "n" 的选择)：蓝色箭头指向 EOM 信号上升沿，正好位于蓝色“类空区域”内。
- **Detection gate τ_d** (探测门)：绿色高亮区域，位于 400ns - 450ns 之间。

图 7：“延迟选择”实验的时序，以时空图表示。5 ns 宽度的时钟脉冲是通过检测 532 nm 泵浦激光束的一部分产生的。由于 N-V 色心的辐射寿命，单光子脉冲是在持续时间 $\tau_{sp} = 44.5 \pm 0.5$ ns 的门控期间发射的。所有电子设备均基于 FPGA 可编程电路，具有几纳秒的抖动。为了计入传播延迟和响应时间，施加于光子“n”的测量是与时钟脉冲“n-1”同步的，该脉冲触发了光子“n-1”的发射（参见对应于光速传播的绿色弯曲曲线）。应用于光子“n”的测量序列分三步完成。首先，决定干涉仪配置的二进制随机数

由 QRNG 与单光子“n”发射的触发信号同时生成。然后，这个二进制随机数（对于光子“n”等于 0）在 40 ns 内驱动 EOM 电压在 $V = 0$ 和 $V = V_{\pi}$ 之间切换，如图中红线所示。最后，单光子脉冲在输出端口 D1 或 D2 处被检测到，此时它已在干涉仪中飞行了时间 T_{interf} 。这种检测是在持续时间 $\tau_d = 40 \text{ ns}$ 的门控期间完成的，该门控由三个间隔 20 ns 的电子 D 锁存器生成（绿线）。蓝色区域代表与事件“光子‘n’进入干涉仪”相关的类空域（space-like domain）。显然，光子“n”的开启或关闭配置的选择完全处于该区域内。

9

【高三解读】

核心概念：怎么证明光子没有“作弊”？

这一页实际上是在展示一个物理界的“不在场证明”。

我们正在讨论著名的**“延迟选择实验”(Delayed-Choice Experiment)。这个实验的核心是为了探索光到底是粒子还是波。惠勒 (Wheeler) 提出一个惊人的想法：如果我们等光子已经**进入了干涉仪（就像进了迷宫），在它快要出来的一瞬间，我们再随机决定是测它的“波动性”还是“粒子性”，光子会怎么表现？

这张图的核心目的，就是用极其精确的时间（纳秒级）和空间数据，证明实验操作不仅快，而且**快到了违背因果律的边缘**——也就是所谓的“类空分离”。

简单来说，图中的**蓝色三角形区域**是“安全区”。在这个区域里做出的“决定”(即改变测量方式)，从物理学上讲，根本来不及传递任何信号给刚进门的光子。这证明了光子不可能提前“偷看”到我们要怎么测它，从而排除了它作弊的可能性。

难点解析

1. 什么是“类空分离” (Space-like Separated)?

这是狭义相对论的一个概念，也是本页最硬核的知识点。

- **背景：**爱因斯坦告诉我们，宇宙中信息传递的最快速度是光速 c 。

- **解析：**假设有两个事件 A 和 B。如果 A 发生后，光都没有足够的时间飞到 B 发生的地方，那么 A 绝对不可能影响 B。这就叫“类空分离”。
- **图中应用：**
 - **事件 A：**光子进入干涉仪（Input 处）。
 - **事件 B：**QRNG（随机数生成器）决定怎么测量光子。
 - 图中的**蓝色区域**就是经过精密计算的区域。作者骄傲地展示：看！我们的“决定”（Choice箭头）就落在这个蓝色区域里。这意味着，就算光子有某种未知的通信能力，只要它不超光速，它在进门时就不可能知道我们后来做的决定。

2. 复杂的时序图怎么看？

别被密密麻麻的线条吓到，我们按时间轴（X轴）拆解：

- **0 ns (起点)：**时钟信号触发，激光准备。
- **~150 ns (Input)：**光子像长跑运动员一样，进入了赛道（干涉仪）。
- **~240 ns (关键时刻)：**注意那个**蓝色箭头“Choice”**。此时光子正在跑道中间跑着呢，我们突然按下开关（EOM电压变化，红线凸起），改变了终点的测量装置。
- **~400 ns (Output)：**光子冲过终点，被探测器（绿色 Detection gate）捕捉。

3. FPGA 和 Jitter (抖动)

- **FPGA：**就是这一整套高精尖操作的大脑（一种可编程芯片），用来控制纳秒级的同步。
- **Jitter：**指电子信号的不稳定性。文中提到“几纳秒的抖动”，说明实验精度极高，必须把误差控制在极小范围内，才能确保那个“不在场证明”成立。

知识联想：高中生能学到什么？

1. 物理 - 狭义相对论：

- 回顾公式 $s = ct$ 。如果 $\Delta s > c \cdot \Delta t$ ，那就是类空分离。这个实验是相对论光锥概念的完美实战应用。

2. 物理 - 波粒二象性：

- 我们在高中学过光既是波也是粒子。这个实验深入探讨了“观测”对现实的影响——我们是在测量前决定了光的性质，还是测量这一行为本身“创造”了现实？

3. 数学 - 逻辑与集合：

- 图表中的“n”, "n-1" 代表序列。实验设计需要严密的逻辑，比如测量第 n 个光子时，其实是参考了第 n-1 个时钟信号，这种递归思维在数列和编程中很常见。

4. 技术与工程：

- 从理论物理到实验验证，中间隔着巨大的工程鸿沟。为了验证一个哲学般的物理假设，科学家动用了激光、FPGA、高速电子开关，把时间切分到纳秒（ 10^{-9} 秒）级别。这告诉我们：**伟大的科学发现，离不开极致的工程技术支持。**