

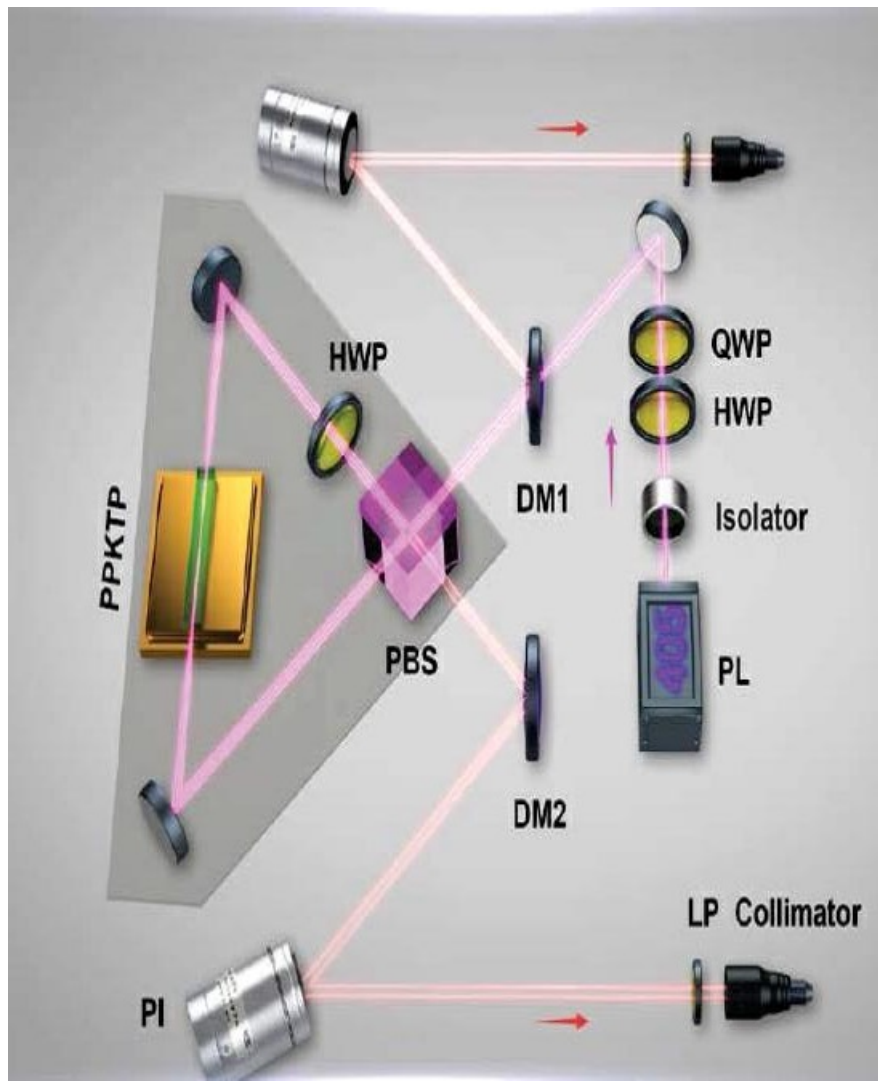
【基礎科研】【戰略】從貝爾實驗談起（二）

2018-08-29 05:40:00

原文網址：<http://blog.udn.com/MengyuanWang/114604567>

又有讀者反應，對潘建偉的批評還有第三類，就是懷疑他實驗中有貓膩，可能造假。這是很嚴重的指控；爲了做出正確的分析，我又重讀了幾遍那篇2017年墨子衛星的論文，並和Zeilinger的幾篇老文章做對比。現在我可以有信心地說，潘建偉的實驗設計，完全依據學術界的主流，物理上絕對沒有問題。他們的結果，驚人的地方，在於工程的精度極高，尤其是整合到衛星上，防震必須做得完美；邏輯上不能絕對排除工程方面有造假的可能性，但是事實上並沒有任何證據或暗示，所以也就沒有理由做這樣的指控。

爲了徹底消除任何人心中的疑慮，我在此詳細討論（這個話題的邏輯，連物理教授都會走偏，是非常專業的，所以非理工請勿入）這些指控中，最核心的那個，亦即糾纏光子對是由偏極分光鏡（Polarization Beam Splitter，PBS）根據偏極方向拆分成兩個，然後才能分開送出給兩地的偵測器。這些人認爲，既然分光鏡對偏極方向做了“測量”，那麼根據量子力學的原理，相干性消失，這對光子的偏極性必然會失去量子糾纏態，成為古典的“一左一右”（反對者假設了光子的偏極是左右旋的方式，其實這些貝爾實驗所用的光子對，偏極是綫性的；不過這個細節在邏輯上並不重要）。



上圖來自潘建偉團隊在2017年發表於《Science》的墨子衛星論文；PL是Pump Laser（激光源），波長405納米（嚴格來說是近紫外綫，“藍光”只是對短波長光子的通稱）；Isolator負責阻止光子重返激光共振腔；HWP是Half Wave Plate，QWP是Quarter Wave Plate，它們在光學實驗裏被廣泛用來調整偏極的相位；DM1和DM2是Dichromatic Mirror，選頻反射鏡，它們必須對810納米的出射光子有極高的反射率，但是對405納米卻是透明。

來自PL的高頻光子通過Isolator、HWP、QWP和DM1之後，打入偏極分光鏡（PBS）。這個PBS根據入射光子的綫性偏極方向，決定將其做直角折射或者容許直綫通過，所以光子進入圖片左邊的三角形環路時，可以是順時針地繞，也可以是逆時針地繞；這種環路叫做Polarization Sagnac Interferometer，PSI，熟悉軍工技術的讀者可能見過，因為所謂的激光陀螺儀，就是三個PSI，對應著XYZ三個軸向。在這裏，不論是順時針或逆時針，405納米的光子都必須穿過一塊非綫性光學晶體，材質是PPKTP（Periodically Poled KTiOPO_4 ），在此經過所謂的Half-Harmonic Generation（又叫Down Conversion）。簡單來說，這種晶體能把一個入射光子轉化成一對頻率減半的810納米光子，而且出射光子對在偏極方向上有著相反性的糾纏。

1990年代末，Weihs和Zeilinger所創的第三代貝爾實驗，原本所用的非綫性光學晶體是BBO（ $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ ），它所產生的光子對，天然就會有個小夾角（大約 6° ），要分離它們很容易。PPKTP的亮度和聚焦性都比BBO好很多，但是它所產生的光子對卻是完全同向的，所以會一起繼續完成上圖中的三角形環路，直到又遭遇了上面提過的偏極分光鏡。

因為光子對的頻率波長相同、方向相同，只有偏極方向相反（精確來說，是相垂直，不過這在理論邏輯上不重要），所以要拆分它們，只能憑偏極方向來選擇。剛好偏極分光鏡就是專門幹這件事的，於是光子對被分別送給DM1和DM2反射之後，經過PI（Piezo Steering Mirror）聚焦，再

加入Beacon Laser（燈標激光，墨子衛星用綠光，地面站用紅光）送往目的地，完成貝爾實驗。

反對者的論點就在於，原本PPKTP產生的光子對有偏極相反的糾纏，它們的量子態可以寫為 $|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle$ （H是水平偏極態，V是垂直偏極態， $|H\rangle|V\rangle$ 指一號光子有水平偏極、二號則是垂直偏極， $|V\rangle|H\rangle$ 顛倒過來，兩者疊加在一起，就不能被寫成兩個單獨粒子態的簡單張量乘積，換句話說，成為糾纏態）；偏極分光鏡把垂直（這裏的水平和垂直，我取相對於實驗桌，所以“垂直”指的是突出上圖紙面的方向）偏極的光子折射90°，水平偏極的光子則直綫通過，所以已經進行了偏極方向的測量，打破了糾纏，光子對的量子態成為古典的 $|H\rangle|V\rangle$ 或 $|V\rangle|H\rangle$ ，後續的實驗就不可能表現出量子現象，貝爾實驗必須失敗。

上面這個邏輯論述，有其道理，但是問題在於它假設糾纏光子對只走一個方向（順時針或逆時針）。然而稍早，我已經提過，入射的高頻光子，在進入三角形環路的時候，也必須通過那個偏極分光鏡，如果這個光子原本就處在綫性偏極方向不確定的相干態（事實上潘建偉的論文提到他們必須把高頻光子先特別用QWP轉化為圓極化的本徵態，Circularly Polarized Eigenstate，其目的雖然沒有明說，但我認為應該就是為了保證在綫性偏極方向上處於相干態），那麼整個環路，包括出射光子對在內，也會處於順時針和逆時針相疊加的相干態。而這個環路的設計，就是順時針的折射=逆時針的通過，反之亦然。

所以糾纏光子對的完整量子態描述，在考慮偏極分光鏡之前

是： $|s,H\rangle|s,V\rangle + |s,V\rangle|s,H\rangle + |n,H\rangle|n,V\rangle + |n,V\rangle|n,H\rangle$ ，這裏s代表順時針，n代表逆時針。如果我們把抵達DM1的光子稱為一號，DM2稱為二號，那麼量子態在考慮偏極分光鏡之後，成為 $|s,V\rangle|s,H\rangle + |n,H\rangle|n,V\rangle$ 。既然我們沒有去測量順時針還是逆時針，這個自由度並沒有成為確定的物理量，所以可以忽略不計，於是量子態還是成為 $|V\rangle|H\rangle + |H\rangle|V\rangle$ ，正是貝爾實驗所需的糾纏態。

我在一開始研究這個問題的時候，就覺得這個使用PSI的解決方案非常聰明（Clever）；後來發現它的確是由好幾個國際團隊在2000年代，一再嘗試、精益求精，才完善得到的。有興趣深入研究的讀者，可以參考Zeilinger在2007年所寫的這篇總結論

文<https://www.univie.ac.at/qfp/publications3/pdf/2007-24.pdf>。過去十年，全世界貝爾實驗的精度和距離，都突飛猛進，最主要的貢獻，就來自從BBO改為PPKTP+PSI的設計改進，潘建偉的團隊也不例外。

總結來說，墨子衛星的物理是毫無問題的；工程上的質疑，則必須有根據，而目前完全沒有，那麼就不應該無的放矢。對潘建偉團隊的工作，如果有反對的聲音，只能專注在應用層面上；這一點我已經在前一篇文章仔細討論過了。

【後註】昨天才在留言欄裏談到炒作環路的最後一個環節是外國人也跟風來模仿競爭，今天就有新聞報導美國確定要在國際空間站裝設“量子激光”（參見<https://www.wired.com/story/nasas-plan-to-turn-the-iss-into-a-quantum-laser-lab/>），也就是美國版的墨子衛星。此外，Trump政權的2021年度預算，包含了2.37億美元的“量子互聯網”投資。

6 条留言

以前我在網路上說 中國量子衛星精度比日本高 並不是量子技術多進步 反而是傳統工程領域的超前 結果被群綠色生物瘋狂圍攻 不過話說回來 實在很好奇中國到底是用甚麼黑科技從衛星上收到單光子

“

低功率PL，每秒只發出三百萬光子，然後用時間空窗（2.5納秒）、空間視角、光子頻率來過濾，達到信號光子佔87%。貝爾實驗成功的要求是82%，所以他們能得到 $S=2.37$ ，違反了CH不等式。

无奈的小猪

2018-08-30 14:56:00

1L的体验，不仅在台湾发生过，在大陆亦如此。中国国民的自信和迷信总是滞后于自身环境的进步，要站起来需要不少时间。罗思义先生在《一盘大棋-中国新命运解析》书中写道：中国自身的巨大成就和国民深度的自卑形成了鲜明的反差，他本人感到很吃惊。

无奈的小猪

2018-08-30 15:50:00

王先生，我有一个关于意识形态的个人看法，即：一代人（包括父，子辈）的意识形态和价值观，会受到前两百年世界历史决定性的影响，这个看法对吗？

我个人觉得，东方漫长辉煌的历史在西方看来只存在于书籍和想象之中吧，因为这两百年的历史就是西方的逆袭和发家史，他们只相信零和思维才是维持霸权不倒的灵丹妙药？而这两百年中也是日本存在感比较强的时期，所以也成了国人对日迷信的基础。我一直觉得日本近代对中国的超越只是历史的小概率事件，中国只要道路正常走，日本的结局只能是偏居一隅，自古的历史就是如此。不知道您和博客的其他读者有没有和我大致相同的看法？

近代的中国体制崩解，内忧外患，但西方的科学发展跨过了征服自然的临界点，导致他们对外扩张和干涉其他文明所产生的影响大大加强，这些因素综合起来使得中国千年来朝代更迭的区域自愈机制彻底失灵，国家一片混乱。才给了日本一乘之机？

entanglement

2018-09-03 13:13:00

我聽潘在介紹墨子號的演講中討論如何處理不小心發射兩顆相同光子的問題，還以為墨子號能實用，300萬個光子跟兩個光子差太多了吧 PS: 我沒看他原始論文，因為他們真正的秘訣肯定不會寫在論文裡

“

確實，因為貝爾不等式本身就是統計上的結果，基於貝爾實驗的量子加密也必須是用統計方法的，那麼每個位元的交換都必須有上千對信號光子，效率很低。用衛星的好處是，光子所須要通過的介質（大氣層），比其他手段（如光纖）少了很多，所以潘建偉的團隊能打破傳輸距離的世界記錄。壞處則是衛星飛行很快，兩地之間的通訊窗口很短，一次幾分鐘。做學術實驗沒關係，反正累積幾個月的實驗結果就是了；但是工業應用要求一次完成幾百個密碼位元的交換，每個位元都是一個完整的統計實驗。他們的論文雖然含糊其辭，但是我估算墨子衛星還差了4個數量級的頻寬。

K.

2018-09-12 09:23:00

据科技日报9月12日报道，随着量子物理装置技术水平的快速发展，实现量子霸权似乎日益临近。称霸标准已成为量子计算领域最重要的科学问题之一。记者11日获悉，国防科技大学吴俊杰团队与上海交通大学金贤敏合作，在国际上最先开启了称霸标准的研究。最近，《国家科学评论》在线发表了他们的研究成果，报道了玻色采样案例的称霸标准。量子计算拥有的超越所有经典计算机的计算能力被称为量子霸权，但在物理实验上，迄今还没有任何一台量子装置在实际实验中展现出这种能力。实现量子霸权，将代表超越经典的量子计算能力从理论走进实验，标志着一个新的计算能力飞跃时代的开始。论文的作者之一刘雍介绍，玻色采样问题是一种针对光子（玻色子）系统的量子霸权测试案例。理论上，经典计算机求解玻色采样需要指数量级计算时间，而量子计算只需要多项式量级计算时间。与此同时，相比通用量子计算，玻色采样更容易实现。该项研究中，吴俊杰与金贤敏在“天河二号”超级计算机上完成了玻色采样问题的核心难题——积和式的求解。实际测试的问题规模达到48个光子，并推断出“天河二号”模拟50个光子的玻色采样需要约100分钟。也就是说，一旦实际的量子物理装置实现了每组样本100分钟以内50光子的玻色采样，就在求解这个问题上超过了“天河二号”，实现了量子霸权。刘雍指出，因为并不要求用于展示量子霸权的问题具有任何实际用途，实现量子霸权离实现实际的量子计算机尚有很大距离。多项称霸标准的研究成果也表明，当前实现量子霸权绝非易事。

https://www.guancha.cn/industry-science/2018_09_12_471713.shtml

“ 這篇宣傳稿的貓膩，在於： 1) 光子適合用在貝爾實驗，卻不適合量子計算；這是因為前者須要遠距離傳輸，後者卻是局限在一部機器裏，而且必須與傳統的電子綫路相交流。用電子來做為計算的量子，要方便得多。可惜光子是波色子，而電子是費米子； 2) 這篇論文討論的計算問題，是對量子計算特別友善但沒有什麼實際用處的； 3) 他們所說需要的量子位元，當然是邏輯位元；這用電子的話，是大約每10000個物理位元對應1個邏輯位元；用光子的話，只怕連對應的物理位元數都無法估計。

yfzzz

2020-04-21 03:39:00

量子通信新报道 最近成都研究所论文承认量子通信对气象条件要求很高，可行性低

“ 這還只是技術細節上的可行性問題；從系統的觀點，毛病更大得多。不過在中國學術界假大空橫行的環境下，“大”要比“假”和“空”好得多。搞這一行的，利用遙不可及的戰略應用來要錢，然後拿著全世界最龐大的資金來做獨門實驗，獨門實驗自然能上一流期刊和科普文章，最後鼓噪成熱門，於是連外國人也開始討論遙不可及的戰略應用，形成一個完美的環路。然而這個套路在歐美學術界也很普遍，比起造假或是超弦這種完全空洞的玄學，至少它是真的科學進步，只不過是重要性被遠遠誇大了而已。我以前已經說過，和假大空做鬥爭，要分輕重緩急，這一類屬於輕緩，不應該是當前打假的重點。

[返回索引页](#)