

粒子物理中量子纠缠的历史起源

施 郁^{1,2*}

1. 中国科学技术大学, 合肥 230026

2. 中国科学技术大学上海研究院, 中国科学院量子信息与量子科技创新研究院, 上海 201315

摘要: 本文系统深入地梳理了粒子物理中量子纠缠的历史起源。1957 年, 玻姆和阿哈诺罗夫指出, 1949 年吴健雄和萨克诺夫的实验实现了爱因斯坦-波多尔斯基-罗森关联。事实上, 这是历史上第一次在实验中明确实现空间分离的量子纠缠。惠勒最早建议这个实验, 作为对量子电动力学的检验, 但是计算有误, 正确的理论计算来自沃德和普赖斯, 以及斯奈德、帕斯特纳克和奥恩博斯特尔, 也符合杨振宁 1949 年的选择定则。1964 年贝尔不等式发表后, 人们考虑, 它是否可以通过吴-萨克诺夫实验检验。这推动了该领域的发展, 吴健雄小组也做了新的实验。1957 年, 李政道、厄梅和杨振宁确立了 K 介子的量子力学形式, 并发现中性 K 介子是一个双态系统。1958 年, 基于与杨振宁 1949 年选择定则类似的方法, 戈德哈贝尔、李政道和杨振宁最早写下 K 介子对的纠缠态, 其中单个 K 介子可以带电, 也可以电中性。这首次给出光子以外的高能粒子的内部自由度纠缠。1960 年, 作为没有发表的工作, 李政道和杨振宁又讨论了中性 K 介子对的纠缠态。本文也顺便介绍了几位物理学家, 特别是沃德。

关键词: 正负电子对; 纠缠光子; 赝标量介子; 纠缠介子; K 介子

中图分类号: O469

文献标识码: A

DOI: 10.13725/j.cnki.pip.2023.03.001

目 录

参考文献

65

I. 引言	57
II. 高能光子的量子纠缠	58
A. 正负电子湮没导致的纠缠光子	58
B. 对几位物理学家的介绍	59
1. 普赖斯	59
2. 沃德	59
3. 斯奈德	60
4. 帕斯特纳克	60
C. 吴健雄-萨克诺夫实验	60
D. 杨振宁的选择定则	60
E. 与量子纠缠概念相联系	60
F. 吴健雄小组的实验能用来测试贝尔不等式吗?	61
III. 介子纠缠	62
A. 李政道、厄梅和杨振宁: 中性 K 介子作为量子力学双态系统	62
B. 戈德哈贝尔、李政道和杨振宁: 最早写下的介子纠缠态	62
C. 李政道和杨振宁: 中性 K 介子的纠缠态	63
D. 弗里德伯格的工作	64
IV. 寻找 0 到 1 的踪迹	64
致 谢	64

I. 引言

1935 年, 爱因斯坦 (A. Einstein)、波多尔斯基 (B. Podolsky) 和罗森 (N. Rosen) 指出, 局域实在性与量子力学完备性有冲突^[1]。这被称为 Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) 佯谬, 所讨论的关联被称为 EPR 关联, 薛定谔称之为量子纠缠^[2]。EPR 讨论的例子是两个粒子的位置或者动量 (连续变量) 的纠缠。1951 年, 玻姆 (D. Bohm) 给出 EPR 佯谬的自旋 1/2 (分立变量) 版本^[3]。1964 年, 贝尔 (J. Bell) 提出, 局域实在性导致一个不等式, 后被称为贝尔不等式, 而量子力学计算结果违反该不等式^[4]。后来, 实验结果与量子力学结果一致, 也违反贝尔不等式。

在最近一篇文章中, 我简单提及了粒子物理中量子纠缠的两个例子, 一个是正负电子湮没所产生的纠缠光子, 另一个是纠缠介子^[5]。在光学、原子物理和凝聚态物理等低能物理领域的量子纠缠实验兴起之前, 粒子物理中量子纠缠提供了量子纠缠的具体实例, 扮演了一定的历史角色。我们熟悉的华人物理学家吴健雄、杨振宁

收稿日期: 2023-04-13

* E-mail: Yu_shi@ustc.edu.cn

和李政道都曾对这方面有所贡献，包括间接的贡献。我曾在学术会议和报告中对此作过介绍，在相关研究论文中也一直引用。2007年11月，在杨振宁先生85岁寿辰学术会议上，我的报告标题是“杨振宁教授与粒子物理中的量子纠缠”，摘要中写道：“杨振宁教授的一些工作与粒子物理中的量子纠缠态有关系。”^[6]在2022年5月31日东南大学举办的吴健雄先生诞辰110周年国际学术研讨会上，我的报告标题是“吴健雄的科学精神：从量子纠缠到宇称不守恒”，摘要写道：“1950年，吴健雄先生及其学生完成正负电子湮没、产生光子的符合实验，准确验证了量子电动力学的预言。这也是人类第一个精确调控产生的、空间分离的量子纠缠态，虽然当时她没有注意这一点。”2022年11月中国物理学会秋季会议上，我的报告摘要写道：“也借此机会介绍吴健雄、李政道和杨振宁的相关工作。”

本文对此议题的物理细节及其发展历程做深入的梳理，澄清一些历史，披露一些不太引入注意的方面。比如，关于正负电子湮没所产生的纠缠光子，在惠勒 (J. Wheeler) 的最初工作之后，几位理论物理学家对此作出重要贡献，而杨振宁1949年著名的光子选择定则也与此密切相关。再比如，杨振宁和李政道在完成获诺贝尔奖的工作之后，关于K介子的一系列理论工作为介子纠缠奠定了理论基础。1958年，戈德哈贝尔 (M. Goldhaber)、李政道和杨振宁讨论了K介子纠缠态，首次给出光子以外的粒子的内部自由度纠缠，具有重要历史意义。后来，作为未发表工作，李政道和杨振宁又讨论了中性K介子纠缠态。

II. 高能光子的量子纠缠

A. 正负电子湮没导致的纠缠光子

1930年代，基于狄拉克方程和量子电动力学，狄拉克等一批物理学家研究所谓的“对理论”，即正负电子对产生和湮没的理论。1946年，惠勒在一篇获得纽约科学院奖励的论文中，系统讨论了正负电子形成的束缚态，最简单的是一个正电子和一个电子构成的正负电子偶素，他也讨论了如何检验“对理论”，建议的途径是：探测正负电子湮没产生的光子^[7]。惠勒指出，湮没主要来自正负电子偶素的自旋单态，即总自旋为0的量子态，因此如果轨道角动量也为0，那么总角动量也为0，从而湮没所产生的相背运动的两个光子的线偏振方向必须互相正交，以满足角动量守恒。他建议，在实验中，每个光子分别被散射，然后分别被探测，通过二者

的符合，记录两个光子都被探测到的事件。

这里的光子散射是被电子散射，也就是康普顿散射。对于每个光子来说，偏振方向决定了散射之后的运动方向分布。因此如果两个光子的偏振互相垂直，那么散射后的运动方向大概率也互相垂直。这就是说，康普顿实验相当于偏振测量，但是我们后面将要解释，这个“测量”是不完全的。

每个光子在散射前后的运动方向的夹角叫做散射角。但是两个相背运动的光子各自被电子散射后，即使它们的散射角一样，运动方向不一定平行，因为在与散射前的运动方向相垂直的平面上，运动的方位可以不同 (图1)。惠勒建议，研究这两个光子散射角相同的情况下，散射方向垂直的概率与相同的概率之间的反对称性 (二者之差除以二者之和)。这个非对称性与散射角有关。惠勒计算了散射角为 90° 情况，认为当方位角相差 $74^\circ 30'$ 时，非对称性最大。

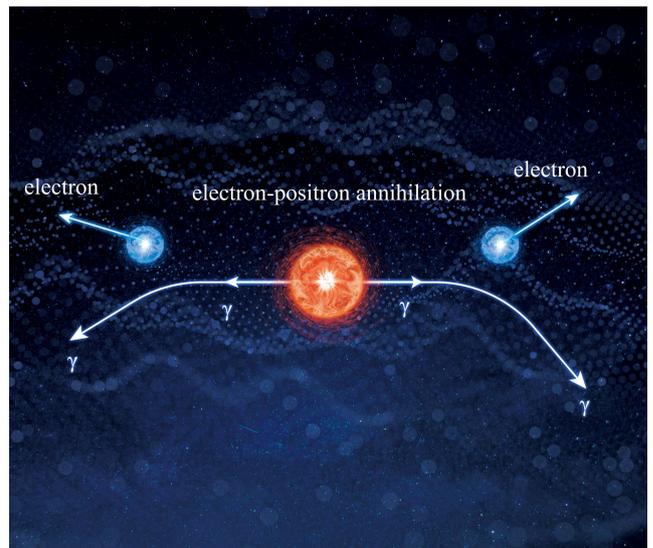


图1. 正负电子湮没后产生相背运动的两个光子，分别被电子散射。

惠勒提出了原创想法，但是计算有误。正确结果由两个小组独立给出，沃德 (J. C. Ward) 和普赖斯 (M. Pryce) 的论文1947年6月18日收稿^[8]，而斯奈德 (H. Snyder)、帕斯特纳克 (S. Pasternack) 和奥恩博斯特尔 (J. Hornbostel) 的论文1947年11月24日收稿^[9]。这两组作者计算出，非对称性的最大值是2.85，发生在散射角是 82° 的时候，这修正了惠勒的计算结果。据称，达立兹 (R. H. Dalitz) 也独立得到结果，但是没有发表^[10]。

正负电子湮没所产生的两个光子的偏振是互相关联的，用今天的常用语言说，是量子纠缠的。惠勒没有在文章中明确写下纠缠光子的量子态，但是他的计算显然基于偏振纠缠态，因为他说得很清楚，正负电子处于自旋单态，即反对称态，而湮没产生的两个光子有“类似的偏振现象”。

但是沃德和普赖斯注意到，惠勒搞错了动量态。他们发表的短文只报告了计算结果，没有写量子态。但是这个工作是沃德博士论文的一部分^[10-12]。他的博士论文详细指出，光子的动量态也是一个反对称态，这样保证两个光子在总体上是交换对称的，服从玻色统计。

用我们今天的符号，光子对的量子态可以写成 $1/2(|x\rangle|y\rangle - |y\rangle|x\rangle)(|\mathbf{k}\rangle - |-\mathbf{k}\rangle - |-\mathbf{k}\rangle|\mathbf{k}\rangle)$ ，其中 $|x\rangle$ 和 $|y\rangle$ 代表两个正交方向的线偏振态， $|\mathbf{k}\rangle$ 和 $|-\mathbf{k}\rangle$ 代表方向相反的两个方向的动量态。

斯奈德、帕斯特纳克、奥恩博斯特尔的论文给出了正确的量子态与详细计算。他们在摘要里指出，光子散射充当了另一光子的偏振的“部分分析”。虽然他们给出的散射方向垂直和平行的光子数都漏了因子 2^[11]，但是这不影响反对称性。

B. 对几位物理学家的介绍

这几位物理学家已鲜为人知，值得在此插入一点介绍。

1. 普赖斯

普赖斯是玻恩 (M. Born) 在英国剑桥大学时与富勒 (R. H. Fowler) 合带的学生，学习期间也曾访问普林斯顿，得到泡利 (W. Pauli) 和冯诺依曼 (J. von Neumann) 指导，后来成了玻恩的女婿。太阳中微子猜想通常归功于彭蒂科沃 (B. Pontecorvo)，其实是由普赖斯提出的，当时他们都在加拿大的乔克里弗实验室 (Chalk River Laboratories)^[13,14]。1946 年，普赖斯回到牛津，沃德成为他的第一个研究生，普赖斯给的题目就是检验惠勒关于正负电子湮没的结果，并告知用偏振纠缠态作为起点^[10,11]。沃德回忆说：“这是我的量子力学第一课，其实也是最后一课，因为其余只是可以从书上学来的技术。”^[10]

2. 沃德

沃德博士论文的另一部分是将施温格 (J. Schwinger) 的电子自能重正化从一阶推广到所有阶^[10,11]。他在悉尼大学做了一年辅导教师后，回牛津完成博士论文答辩，并留在牛津做了两年研究，提出了沃德恒等式。这是他最著名的工作，说明重正化之所以成功，是因为规范不变性将不同的无穷大联系起来，是很深刻的结果，成为量子场论中的重要内容。然后他访问普林斯顿高研院一年。他听一个关于二维伊辛模型的学术报告时，想到将组合学方法用在这里，1952 年与卡茨 (M. Kac) 就此合作发表了一篇论文。

2023 年 3 月 6 日，我问杨先生：“1952 年，沃德和卡茨在普林斯顿高研院，用组合学方法研究了伊辛模型。他们有没有和您谈过这个工作？”杨先生立即回答：“谈过。而且我在他们工作基础上迅速做了个工作。”杨先生是指在他和李政道关于相变的单位圆定理文中，将卡茨-沃德的方法从零磁场推广到虚数磁场，成为文章中巨配分函数零点分布的一个例子，有趣的是，这个想法也产生于听一个关于二维伊辛模型的学术报告，这次是关于卡茨-沃德方法的报告^[15,16]。我问杨先生，这个报告是谁做的，杨先生说是卡茨和沃德两个人。

沃德在 1967 年成为澳大利亚麦考瑞大学教授之前，每个工作在职时间都不长。1955 年，他回英国参加氢弹项目，在得到“先裂变，再聚变，用到中子屏蔽”的提示后，重复出了 4 年前美国的乌拉姆-特勒方案，特别是辐射内爆，第二年回到美国^[10,11]。沃德的关键贡献一直得不到英国官方承认，虽然他和萨拉姆 (A. Salam) 都曾为此写信给撒切尔夫人。

1960 年前后，沃德 (在美国) 与萨拉姆 (在英国) 合作，研究规范场理论，1961 年提出一个 SU(3) 强相互作用理论，1964 年得到格拉肖 3 年前的 U(1)×SU(2) 电弱理论。温伯格 1967 年用自发对称破缺得到 U(1)×SU(2) 电弱理论，萨拉姆同年在课堂上、次年在诺贝尔研讨会上提出同样的理论，格拉肖、萨拉姆和温伯格分享了 1979 年诺贝尔物理学奖^[17]。

2021 年 7 月，我向杨先生请教有关 1979 年诺贝尔物理学奖的事。杨先生提到：“格拉肖的诺贝尔奖基于他 1960 年代提出 SU(2)×U(1) 的文章。”我说：“萨拉姆说，他和沃德独立做出了这个。但是他们的文章是 1964 年发表的，比格拉肖晚了 3 年。萨拉姆也说，他也独立做出了温伯格做出的工作，但是工作是在会议报告里宣讲的。”杨先生说：“很多人怀疑，萨拉姆和温伯格会面，将沃德抛弃了。1990 年代早期，沃德突然出现

在我在石溪的办公室。他抱怨被诺贝尔奖遗漏了。他还抱怨英国不承认他对英国氢弹的贡献。1950年代，在普林斯顿高研院，我是非常欣赏沃德的原创性的人。”我2022年2月又提到：“沃德声称设计了英国的氢弹。”杨先生答复：“他确实那么说的，在他老了后。”

沃德一生虽然只发表二十多篇论文，却有重要成就^[10-12]。

3. 斯奈德

斯奈德是奥本海默 (J. Oppenheimer) 的学生。1939年他们提出“连续引力塌缩”^[18]。1947年，斯奈德发表量子化时空的论文^[19]，同一年，杨振宁作为博士生对此做了进一步讨论^[20]。1950年代，斯奈德与库朗 (E. D. Courant) 和利文斯顿 (M. S. Livingston) 提出加速器的强聚焦原理^[21,22]，被用在 CERN 和布鲁克海文实验室。斯奈德 49 岁早逝^[23]。

4. 帕斯特纳克

帕斯特纳克是最早关注后来被称作兰姆位移的现象的理论家之一^[24]。1934年，加州理工学院的休斯顿 (W. Houston) 和谢玉铭发现，氢原子光谱的巴尔默线系（电子从高能级跃迁到第二壳层时发出的谱线）的精细结构偏离狄拉克方程的预言，并在奥本海默和玻尔 (N. Bohr) 启发下，正确指出这来自电子与电磁场耦合导致的自能。康奈尔大学的吉布斯 (R. C. Gibbs) 和威廉斯 (R. C. Williams) 也观察了相同的现象，并将原因归结为第二壳层的零角动量 (2s) 能级移动。1938年，帕斯特纳克在加州理工读博士时，与休斯顿讨论后，也得到第二壳层零角动量能级 (2s) 移动的结论，但是将原因归于电子与原子核的相互作用。后来这个现象甚至被称为帕斯特纳克效应，启发了兰姆 (W. Lamb) 和雷瑟福德 (R. Retherford) 用高精度的微波技术测量第二壳层的零角动量能级 (2s) 与角动量量子数为 1 的能级 (2p) 的差别，即兰姆位移^[25]。兰姆因此获得诺贝尔奖。帕斯特纳克后来成为《物理评论》(Physical Review) 的编辑^[26]。

C. 吴健雄-萨克诺夫实验

1949年，吴健雄和她的学生萨克诺夫 (I. Shakhov) 研究了正负电子湮没所产生的纠缠光子，测量它们各自被散射后的角关联^[27]，验证了惠勒、沃德-普赖斯和斯奈德-帕斯特纳克-奥恩博斯特理论预

言。

在吴健雄和萨克诺夫的工作之前，理论研究引发了至少两个组的实验工作，但是实验不理想，不能给出明确结论，问题出在光子探测器的效率以及实验条件。正如吴健雄-萨克诺夫文章中所写：“最近发展出的闪烁计数器被证明是可靠高效的光子探测器。”

吴健雄和萨克诺夫将光子探测效率提高到盖革计数器的 10 倍，从而使得符合计数率提高了 100 倍。他们用了两个光电倍增管和两个蒽晶体。他们在哥伦比亚的回旋加速器上，用氘核撞击铜 64，产生正电子。然后正负电子湮没，产生两个光子，分别在两个蒽晶体里被电子散射。在他们的实验中，平均散射定为 82° ，即理论上给出最大非对称性的角度。做符合探测时，一个探测器保持固定，另一个探测器的方位角取了 0° 、 90° 、 180° 和 270° 。非对称性测出是 2.04 ± 0.08 ，非常接近理论值 2，一锤定音验证了量子电动力学的预言。

D. 杨振宁的选择定则

1949年，杨振宁基于空间旋转和反演不变性，给出粒子衰变为两个光子的选择定则^[16,28]。这个工作直接起因于介子衰变问题，但是也将正负电子湮没纳入讨论，文章第一句话就引用惠勒所说的正负电子偶素的三重态不能衰变为两个光子，接着说，矢量和赝矢量介子也是如此，而且还引用了惠勒和上述两组作者关于光子偏振互相垂直的结果^[7-9]。杨振宁证明，这些都是空间转动和反演的守恒导致的选择定则的后果。顺便看到，杨振宁在芝加哥大学读书期间，引用了两次斯奈德。

杨振宁的选择定则文章 1949 年 8 月 22 日收稿，1950 年 1 月 15 日发表。而吴健雄和萨克诺夫的文章 11 月 21 日收稿，迟于杨振宁论文的收稿时间，但是 1950 年 1 月 1 日发表，收稿和发表又都早于杨振宁论文的发表时间。显然，他们和杨振宁当时互相不知道对方的工作。

E. 与量子纠缠概念相联系

1950 年以前，关于正负电子湮没所产生的光子对，一直到杨振宁、吴健雄和萨克诺夫，所有的研究都没有与量子纠缠概念相联系。现在我们回到量子纠缠这条线索。

1935 年，EPR 文章发表几个月后，薛定谔为 EPR 关联起了“量子纠缠”这个名字，但是认为这是不合理的。他认为 EPR 佯谬源于将非相对论量子力学用到适用范围之外。因此，他还讨论了一种可能性，即纠缠粒

子分离之后，叠加系数失去相位关系，量子纠缠自动消失，退化为直积态的概率混合，也就是说，不同的直积态以一定的概率出现。这样既避免了 EPR 佯谬，也与当时已经做过的实验（不涉及纠缠）不矛盾。当然，当时还没有纠缠实验，所以薛定谔声明这是假设。他在这个议题上连写了 3 篇文章，两篇英文和一篇德文^[2,29,30]。法瑞 (W. Furry) 也连写了两篇文章^[31,32]，考察量子纠缠态（即直积态的相干叠加）与直积态的概率混合这两种不同情况。薛定谔质疑纠缠态的合理性，而法瑞却与此相反，认为与量子力学不一致的情况才是不合理的。他们都讨论了这两种情况的不同，但是只有薛定谔的第二篇英文文章具体假设了 EPR 纠缠对分离后，从纠缠态变为概率混合^[29]。在后来的文献中，薛定谔的这个假设以及对量子纠缠的质疑却经常被误会成法瑞所做。薛定谔和法瑞的几篇文章的发表时间线是：薛定谔第一篇英文文章（1935）、薛定谔德文文章（1935）、法瑞第一篇（1936）、薛定谔第二篇英文文章（1936）、法瑞第二篇（1936）。法瑞第二篇文章引用了薛定谔第一篇英文文章和德文文章。薛定谔的德文文章讨论了测量引起的纠缠消失，也提出了著名的薛定谔猫佯谬^[29]。

可以看到，爱因斯坦和薛定谔不愧为大师，他们不喜欢量子力学的概率诠释，没有参与在此基础上的后续发展，但是在需要时，又能够在量子力学理论框架内做出深刻的分析。他们的理论分析是我们今天所熟悉的。

1951 年，玻姆给出 EPR 佯谬的分立变量（自旋 1/2）版本。1957 年，他和学生阿哈诺罗夫 (Y. Aharonov) 首次将关于 EPR 佯谬的讨论与真实的物理实验联系起来。他们指出，在 EPR 考虑的情形中，粒子之间没有相互作用，波函数也不重叠，但是当时并没有真实的实验证据表明量子力学能应用到这样的多体问题，从而导致 EPR 佯谬。爱因斯坦本人也曾经在玻姆的讨论中说，也许粒子间分离到足够远时，对于这样的多体问题，量子力学自动失效^[33]。

玻姆和阿哈诺罗夫注意到，当时实验上，分立变量的量子纠缠只能在正负电子湮没所产生的光子偏振态中研究，也就是吴-萨克诺夫实验^[33]。玻姆和阿哈诺罗夫不用“纠缠”这个名词，而是用“关联”。他们仔细研究了光子对在康普顿散射后的符合测量中，关联（量子纠缠）的作用。结果表明，只有纠缠态才能给出与吴-萨克诺夫实验结果一致的理论值，而薛定谔和法瑞所讨论过的直积态的经典概率混合则导致非常不同的计算结果。玻姆和阿哈诺罗夫只注意到法瑞的讨论，没有提及薛定谔的讨论。

因此，吴-萨克诺夫实验确实产生了光子的偏振纠

缠态，说明 EPR 关联是物理性质。这是历史上第一次在实验中实现了明确的而且空间分离的量子纠缠。用今天的符号，这个量子纠缠态就是 $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\rightarrow\rangle|\uparrow\rangle - |\uparrow\rangle|\rightarrow\rangle)$ 。所以吴-萨克诺夫实验不仅准确验证了量子电动力学的预言，而且成为量子纠缠实验的先驱。

2015 年，杨振宁指出，吴-萨克诺夫实验“是第一个量子纠缠实验，量子纠缠是 21 世纪很热的新研究领域”^[34]。

F. 吴健雄小组的实验能用来测试贝尔不等式吗？

1964 年发表的贝尔不等式是几个关联函数服从的不等式。以光子为例，每个关联函数所描述的是两个光子沿不同方向的偏振分量之间的关联。为了违反贝尔不等式，这两个方向不能平行或垂直，而是成其他角度。

能否用吴-萨克诺夫实验来测试贝尔不等式呢？贝尔不等式发表后，确实有一些物理学家考察了这个问题，发现不行。

西蒙尼 (A. Shimony) 和霍恩 (M. Horne) 注意到^[35]，吴-萨克诺夫实验设置中，两边所探测的光子偏振要么互相平行，要么互相垂直，而不能改为其他角度。

还有另一个问题，吴-萨克诺夫实验中，光子的偏振是通过康普顿散射来“测量”的，但是光子经过康普顿散射后，散射方向由波函数描述，在各方向都有概率，并不是锁定于某个特定的方向，虽然在垂直于偏振的方向概率最大。因此光子对的符合并不能确定偏振，不是完美的测量。

而且，吴-萨克诺夫实验所研究的是高能光子，其偏振不能像低能光子那样用偏振片和偏振分束器测量，这些装备会被高能光子打穿。后来，光子偏振的量子纠缠主要是通过原子物理、光学、凝聚态物理等领域的低能光子来研究，成为量子信息科学的重要部分，得到蓬勃发展，三位物理学家因这方面的工作得到了 2022 年的诺贝尔物理学奖。

这三位诺奖得主中，克劳泽 (J. Clauser) 的得奖理由的一部分是与西蒙尼 (A. Shimony)、霍恩 (M. Horne) 以及霍尔特 (R. Holt) 将贝尔不等式推广到 CHSH 不等式^[36]。本文表明，这个工作的起源与他们对吴-萨克诺夫实验的分析密切相关。

当时，克劳泽为吴-萨克诺夫实验构造了一个局域隐变量理论结果^[37]，这也印证了这个实验不适合测试贝尔不等式。他也注意到吴-萨克诺夫实验中的特殊夹角，并走访了吴健雄，得到确认^[38]。

克劳泽的来访引起了吴健雄对贝尔测试的

兴趣，她和两位研究生卡什迪 (L. R. Kasday) 和厄尔曼(J. Ullman)进行了新的实验。这一次，他们在两个光子的各种不同的散射角以及方位角测量符合概率。他们的文章 1974 年完成，1975 年发表^[39]。此文引用了杨振宁 1949 年关于光子对产生的选择定则。

但是严格来说，吴健雄小组的新实验仍然不适合贝尔测试，因为正如上文所说，高能光子的偏振不能完美测量，散射后的光子总有一个弥散的波函数分布。不过，卡什迪、厄尔曼和吴健雄指出，如果做两个额外假设：(1) 偏振可以完美测量，(2) 康普顿散射的量子力学公式是正确的，那么实验结果表明与量子力学一致，而与贝尔不等式不一致。

总的来说，吴健雄及其学生关于高能纠缠光子的相隔 25 年的两个工作推动了对量子纠缠和贝尔测试的研究，虽然没有能够严格证明对贝尔不等式的违反，但是实验结果展示了量子纠缠。

1975 年，拉梅伊-拉什蒂 (M. Lamehi-Rachti) 和米蒂希(W. Mittig) 实现了玻姆最初设想的自旋 1/2 的纠缠态。他们用质子束轰击含氢的目标，得到两个质子组成的自旋单态。在一些辅助假设的前提下，实验结果违反贝尔不等式^[40]。

III. 介子纠缠

A. 李政道、厄梅和杨振宁：中性 K 介子作为量子力学双态系统

通常，吴健雄、杨振宁和李政道这三个名字联系在一起，是因为弱相互作用中宇称不守恒。杨振宁和李政道的 1957 年诺贝尔奖是基于 1956 年的理论工作，而这个理论工作的起因是为了解决所谓的 $\theta - \tau$ 之谜^[16,41,42]。而宇称不守恒说明， θ 和 τ 是同一种粒子，被称为 K 介子。既有带电的 K 介子，也有不带电的中性 K 介子。

有趣的是，中性 K 介子也有两种，它们互为反粒子，构成一个双态系统，类似于自旋 1/2。这里的分立变量是味或奇异数。它们是赝标量粒子 (赝标量的意思是，量子态在空间反演下要改变符号)。其他类似的赝标量介子还有 B 介子、D 介子，等等。正反粒子的叠加态是 C(电荷共轭) 或者 CP(电荷共轭-宇称联合操作) 的本征态。因为弱相互作用下 CP 不守恒，所以质量-寿命的本征态 (比如 K 介子有长寿命态和短寿命态) 与 CP 本征态略有不同。

K 介子 (以及其他类似的介子) 可以用简单的

量子力学薛定谔方程描述，这始于 1957 年李政道、厄梅(R. Oehme)和杨振宁的工作^[43]。

1955 年，盖尔曼 (M. Gell-Mann) 和派斯 (A. Pais) 提出由正反粒子的叠加态构成 C 或者 CP 的本征态，但是他们假设宇称 (P) 和电荷共轭 (C) 都是守恒的，所以认为 C 或者 CP 的本征态的产生代表等概率地产生正反 K 介子^[44]。李政道、厄梅和杨振宁考虑到每个分立对称性都有可能破坏，所以存在正反 K 介子的相干叠加。这才使得 K 介子真正类似于自旋 1/2。

2014 年 5 月，我去 CERN 参加一个研讨会，我的报告就是关于介子纠缠态。5 月 8 日，我在给杨振宁先生的信中说：“附上我在 CERN 这里的报告。Wigner-Weisskopf 近似下的 K 介子衰变，以及中微子振荡，可以用简单的量子力学双态或三态系统描述。这些方法是你开办的吗？” Wigner-Weisskopf 近似是一个使得衰变随时间指数衰减的近似方法。

杨先生随即回答：“谢谢你的 PPT。是的，整个混合矩阵的想法源于李-厄梅-杨文章。我们用 Weisskopf-Wigner 形式描述 3 个分立对称性都可能破坏的系统随时间的演化。当时，这个描述方法并不是必要的，因为人们相信两种 K 介子不混合 (因为盖尔曼-派斯)。为了完备起见，我们发展了混合的一般形式。1964 年后，我们的形式成为标准的形式。后来又用到中微子。”

B. 戈德哈贝尔、李政道和杨振宁：最早写下的介子纠缠态

介子的量子纠缠态也始于他们，虽然最初他们没有关注量子纠缠这个概念。1958 年，戈德哈贝尔、李政道和杨振宁最早讨论了一对 K 介子 (θ) 的量子态^[45]。不过他们考虑每个粒子可以处于 4 个态，两个中性态以及正负单位电荷态。虽然他们没有从量子纠缠的角度作讨论，但是事实上这些二粒子态都是纠缠态，其中有 4 个纠缠态都由总电荷为 0 的两粒子直积态进行线性组合而成。

值得提出，给出这些介子内部自由度的纠缠态的方法与杨振宁 1949 年的选择定则是一脉相承的。后者限于在电磁相互作用或强相互作用下，光子的产生，基于角动量和宇称守恒。而介子对的量子态的确立则是基于强相互作用的奇异数、电荷共轭和同位旋守恒，方法与 1949 年的选择定则是一样的。粒子对的整体变量的守恒自然导致每个粒子的各种可能，因此可能是纠缠的。

有趣的是，文章中写道：“我们通过同位旋转动算符和电荷共轭算符的联合使用，证明存在有趣的关联，不

仅在产生上，而且在衰变模式上”^[45]。“产生”是指在奇异数基上，而“衰变模式”是指电荷共轭-宇称 (CP) 基上。他们将每个量子态在这两个基上都表示出来，发现在两个基上都有关联。这个“有趣的关联”正是量子纠缠。所以戈德哈贝尔、李政道和杨振宁触及了量子纠缠的性质。

2012年2月10日，我告诉杨先生：“我在写一篇分析量子纠缠 (EPR 关联) 的 K 介子对的文章，这个领域可以追溯到 1958 年的戈德哈贝尔-李政道-杨振宁的文章“(θ + θ̄) 系统”。现在意大利的 φ 工厂可以产生 K 介子的 EPR 对。”

C. 李政道和杨振宁：中性 K 介子的纠缠态

戈德哈贝尔、李政道和杨振宁写下的 K 介子纠缠态中，存在带电态与中性态之间的叠加，其中有 4 个是带正负单位电荷的状态与两个正反中性态之间的叠加。如果我们限制带电态与中性态之间没有量子相干 (作为一种超选择定则)，那么 4 个纠缠态就全部简化为正反中性态的反对称叠加态，类似自旋单态。

根据英格利斯 (D. R. Inglis) 1961 年 1 月的一篇综述文^[46]，1960 年 5 月 28 日，李政道在阿贡实验室的学术报告中，讨论了可以通过质子-反质子碰撞产生的中性 K 介子 (θ) 关联态。

英格利斯文章中有一章内容来自李政道报告，给出了类似自旋单态的中性 K 介子纠缠态，其中正反中性 K 介子分别类似于自旋向上和向下，由此可以计算出两个粒子均为中性反 K 介子的概率。按照这篇文章所述，李政道和杨振宁注意到同一时刻，两个中性介子不可能都被观测为同为中性 K 介子或同为中性反 K 介子，他们也计算了不同时刻下，两个介子都被观测为中性反 K 介子的概率。

此文对李政道和杨振宁的未发表工作引用如下：“李政道和杨振宁 (未发表)；李政道教授 (私人通信以及 1960 年 5 月 28 日在阿贡 ZGS 用户组会议上的报告)。”

同样发表于 1961 年 1 月的戴 (T. B. Day) 的文章对李政道和杨振宁的未发表工作做了扩展^[47]。引用的方式是：“李政道和杨振宁 (未发表)；李政道教授 (私人通信以及 1960 年 5 月 28 日在阿贡 ZGS 用户组会议上的报告)”。有趣的是，戴的文章还讨论了与正负电子湮没产生的光子对的类似。这正好是我们这篇文章所关注的。

我本人对介子纠缠的起源一般引用如下：“李政道、

杨振宁，描述于 D. R. Inglis. *Rev. Mod. Phys.*, 1961, **33**: 1; T. B. Day. *Phys. Rev.*, 1961, **121**: 1204。”^[48]

2006 年 8 月 21 日我给杨先生的邮件中提到：“最近我写了一篇关于中性 K 介子的文章 (将发表在 *Phys. Lett. B*)，将量子信息方面的一点想法用到粒子物理——其实溯源起来，基于您和李政道在大约 1960 年的工作，你们注意到中性 K 介子可以产生在 (J, P) = (0, -) 的爱因斯坦-波多尔斯基-罗森态。你们这个工作似乎没有发表过，但是在英格利斯的一篇文章中介绍过。”

事实上，这种中性介子纠缠态后来在介子工厂广泛产生和使用 (参见文献^[48-56])。

雅默 (M. Jammer) 在他的名著《*Philosophy of Quantum Mechanics*(量子力学的哲学)》中^[57]，通过引用英格利斯和戴的文章，提到李政道和杨振宁的未发表工作以及李政道在阿贡实验室的报告。

雅默还提到，他 1973 年 3 月 12 日采访了李政道，得知李政道曾经注意到 K 介子关联与 EPR 关联的密切关系不同于经典系综的关联。雅默写道：“李在阿贡实验室做了个报告，关于量子力学在长距离上的惊人效应。在报告中，他讨论了同时产生的相背离开 K 介子之间的某些关联。他意识到这个情形与爱因斯坦、波多尔斯基和罗森提出的问题的密切关系，他很快确信经典系综 (或者说，具有隐变量的系统) 永远不能复制这种关联。但是因为 K 介子的有限寿命造成的复杂化——寿命无穷长时就‘退化’为贝尔讨论的情况——李没有得到与贝尔不等式等效的结论，但是将进一步探讨这些想法的任务交给助手 Jonas Schürtz，但是后者很快做别的课题去了。”雅默注释道：“李政道清楚地表示，所有的功劳归于贝尔教授。”^[57]

1986 年，李政道发表了论文《*Are black holes black bodies*(黑洞是黑体吗?)》，其中讨论了跨越视界的量子纠缠，指出取决于量子态，辐射看上去可能是黑体辐射，也可能很不一样^[58]。作为量子态整体性的例子，文中引用了卡什迪、厄尔曼和吴健雄文章，以及戈德哈贝尔、李政道和杨振宁文章，但是没有引用介绍李政道和杨振宁未发表工作的英格利斯和戴的文章以及雅默的书，也没有提自己在阿贡实验室的报告。

1996 年，我在以色列巴伊兰大学 (Bar-Ilan University) 物理系图书室借了雅默的这本书精读。图书管理员说：“您知道雅默教授就是我们系的吗？”竟然这么巧。原来，雅默是这个系的创始人，还做过校长。后来我和雅默做了一些讨论，不过并没有得到关于李政道和杨振宁未发表工作的额外信息。

2019年8月，我将英格利斯的文章和雅默书的相关页的电子文档发给杨先生。

2019年8月，王垂林教授也曾帮我寻找李政道-杨振宁关于中性K介子纠缠的未发表工作、李政道先生在阿贡实验室的报告以及他与英格利斯通信的第一手资料，没有找到。

D. 弗里德伯格的工作

根据雅默的记载，弗里德伯格(R. Friedberg)在这方面做了一些未发表的工作^[57]。弗里德伯格也是李政道的学生，而且是留在哥伦比亚大学的长期合作者。不知道这个工作有无得到李政道的指导或建议。

1967年，在不知道贝尔的工作情况下，弗里德伯格将局域性假设用于自旋测量，得到与量子力学矛盾的结果。1968年，他将此工作告诉雅默。1969年，他又将此写成一篇没有发表的稿件：理·弗里德伯格，爱因斯坦-波多尔斯基-罗森的实在性判据的可检验后果，1969年，未发表(R. Friedberg, Verifiable consequences of the Einstein-Podolsky-Rosen criterion for reality, 1969, unpublished)^[57]。

弗里德伯格首先将实在性判据重新表述如下。对于两个系统，可以在不扰动第二个系统的前提下，测量第一个系统，也可以在不扰动第一个系统的前提下，测量第二个系统。如果两种测量的结果完全相符，那么这个结果就是实在的一部分，即使没有实际去测量。

他然后考虑每个系统都有3个量 x 、 y 、 z ，取值均为1或-1。对于每个系统，任意两个量都可以同时测量，因为一个量可以直接测量，另一个量可以基于EPR纠缠态，通过测量另一个系统而得到。由此可以得到乘积的平均值满足 $\langle xy \rangle + \langle yz \rangle + \langle xz \rangle \geq -1$ 。但是，对于量子力学自旋，如果 x 、 y 、 z 分别对应于自旋的3个分量，可以证明它们满足 $(\langle xy \rangle + \langle yz \rangle + \langle xz \rangle)^2 \geq 1$ ，违反不等式 $\langle xy \rangle + \langle yz \rangle + \langle xz \rangle \geq -1$ 。德国人比歇尔(W. Bücher)1967年也得到类似的结果^[57]。

1969年，弗里德伯格还做了另一个未发表工作，给出了科亨-斯佩克(Kochen-Specker)定理的一个简化论证^[57]。科亨-斯佩克定理说，在非互文(即与测量装置无关)前提下，不能自洽给观测量赋予确定的数值。

对于吴健雄-萨克诺夫实验，弗里德伯格曾向雅默指出，法瑞考虑的非纠缠情况可以用贝尔不等式的方法来表示，对应的关联函数与纠缠态不一样，后者是一个余弦，前者在此基础上乘以一个大小不超过1/2的系数^[57]。

IV. 寻找0到1的踪迹

现在我们看到，粒子物理中量子纠缠的早期工作起到了促进量子纠缠研究的历史作用。以贝尔的工作为例^[59]，他关于隐变量和贝尔不等式的最早两篇文章(分别于1964年和1966年发表)都引用了玻姆和阿哈诺罗夫1957年文章；1971年一篇文章引用了戴的文章和英格利斯的文章；1975年一篇文章引用了雅默的书，并注明“特别是关于李政道和弗里德伯格的部分”，卡什迪、厄尔曼和吴健雄文章，以及拉梅伊-拉什蒂和米蒂希文章。

2022年12月10日，我在给杨振宁先生的邮件中说：“贝尔不等式方面的工作终于获得了诺贝尔奖，虽然不是给贝尔本人。我记得您在论文选集中提到，访问CERN时，您将您在非对角长程序方面的工作告诉贝尔，贝尔证明了您的一些猜想。”杨先生立即回复：“他非常好。”

本文基本成稿后，2023年3月11日，我向杨先生表达我的看法：“我觉得从量子纠缠的角度，1958年戈德哈贝尔-李政道-杨振宁文章很重要，是首次注意到光子以外的高能粒子的内部纠缠态，文章用与杨振宁1949年选择定则相同的方法，得到作为产物的介子纠缠态，正如光子纠缠态是选择定则的后果，而且这篇文章还注意到介子对在衰变模式上也是关联的，后来李政道和杨振宁又在每个介子为中性的限制下，得到中性K介子纠缠态，这也是后来人们集中关注的。”

1960年李政道和杨振宁在未发表工作中，对中性纠缠态所计算的联合概率(也是后来人们关于这类纠缠态的计算和测量的关键点，类似光子符合概率)是1958所说的衰变模式关联的表现形式。

我们现在注重0到1的突破，但是历史上的0到1往往也不是一蹴而就的。随着时间推移，在0到1过程中的有些科学家的贡献可能被遗忘，特别是如果这些科学家不著名。即使是著名科学家，在某些领域的原创努力也未必都被记住，特别是如果这些领域当时冷门。在科学的前进道路上，从0到1的努力，包括成功的和没有完全成功的努力，值得梳理、考察和学习。

致 谢

感谢与杨振宁先生的交流。本文受国家自然科学基金支持(No.T2241005)。

参考文献

- [1] EINSTEIN A, PODOLSKY B, ROSEN N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?[J]. *Phys. Rev.* 1935, **47**: 777.
- [2] SCHRÖDINGER E. Discussion of time-probability relations between separated systems, mathematical proceedings of the cambridge philosophical society[C]. Cambridge University Press, 1935, **31**(4): 555.
- [3] BOHM D. Quantum theory[M]. New York: Prentice-Hall, 1951.
- [4] BELL J. On Einstein-Podolsky-Rosen paradox[J]. *Physics*, 1964, **1**: 195.
- [5] 施郁. 量子纠缠之路: 从爱因斯坦到 2022 年诺贝尔物理学奖 [J]. *自然杂志*, 2022, **44**(6): 455.
- [6] SHI Y. Prof. C. N. Yang and quantum entanglement in particle physics, proceedings of the conference in honor of C N Yang's 85th birthday[M]. Ed: Ge M L, Oh C H, Phua K K. Singapore: World Scientific, 2008, p. 521.
- [7] WHEELER J. Polyelectrons[J]. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1946, **48**: 219.
- [8] PRYCE M H L, WARD J C. Angular correlation effects with annihilation radiation[J]. *Nature*, 1947, 160: 435.
- [9] SNYDER H, PASTERNAK S, HORNBOSTEL J. Angular correlation of scattered annihilation radiation[J]. *Phys. Rev.* 1948, 73: 440.
- [10] WARD J C. Memoirs of a theoretical physicist[J]. *Opt. J.*, 2014.
- [11] DOMBEY N, WARD J C. Biographical memoirs of fellows of royal society[J]. *Opt. J.*, 2021, **70**, 419.
- [12] DALITZ R H, DUARTE F J. John Clive Ward[J]. *Phys. Today*, 2000, **53**(10): 99.
- [13] 施郁. 诺奖委员会的错误: “幽灵粒子” 中微子是如何现身的 [J]. *科学*, 2019, **71**(5): 46.
- [14] SHI Y. Clarification of early history of neutrino[J]. *Mod. Phys. Lett.*, 2016, **31**: 1630043.
- [15] LEE T D, YANG C N. Statistical theory of equations of state and phase transitions. II. Lattice gas and Ising model[J]. *Phys. Rev.*, 1952, **87**(3): 410.
- [16] YANG C N. Selected papers 1945-1980 with commentary[M]. Beijing: Company Publishers, 1983.
- [17] 施郁. 科学的守护者: 斯蒂文·温伯格 [J]. *低温物理学报*, 2022, **44**: 251.
- [18] OPPENHEIMER J R, SNYDER H S. On continued gravitational contraction[J]. *Phys. Rev.*, 1939, 56: 455.
- [19] SNYDER H S. Quantized space-time[J]. *Phys. Rev.*, 1947, **67**: 38.
- [20] YANG C N. On quantized space-time[J]. *Phys. Rev.*, 1947, 72: 874.
- [21] COURANT E D, LIVINGSTON M S, SNYDER H S. The strong-focusing synchrotron—a new high energy accelerator[J]. *Phys. Rev.*, 1952, 88(5): 1190.
- [22] COURANT E D, SNYDER H S. Theory of the alternating-gradient synchrotron[J]. *Ann. Phys.*, 2000, **3**: 360.
- [23] HARTLAND S. Snyder orbitury[J]. *Phys. Today*, 1962, **15**: 78.
- [24] CREASE R P, MANN C C. The second creation[M]. New Jersey: Rutgers University Press, 1986.
- [25] BROWN L.. The birth of particle physics[M]. Ed: HODDESON L, Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- [26] GOUDSMIT S A. Simon Pasternack[J]. *Phys. Today* 29, 4, 87 (1976).
- [27] WU C S, SHAKNOV I. The Angular correlation of scattered annihilation radiation[J]. *Phys. Rev.*, 1950, **77**: 136.
- [28] YANG C N. Selection rules for the dematerialization of a particle into two photons[J]. *Phys. Rev.*, 1950, **77**: 242.
- [29] SCHRÖDINGER E. Die gegenwertige situation in der quantenmechanik[J]. *Naturwissenschaften*, 1935, **23**: 807.
- [30] SCHRÖDINGER E. Probability relations between separated systems[J]. *Mathematical Proc. Cambridge Phil. Soc.*, 1936, **32**: 446.
- [31] FURRY W H. Note on the quantum-mechanical theory of measurement[J]. *Phys. Rev.*, 1936, **49**: 393.
- [32] FURRY W H. Remarks on measurements in quantum theory[J]. *Phys. Rev.*, 1936, **49**: 476.
- [33] BOHM D, AHARONOV Y. Discussion of experimental proof for the paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky[J]. *Phys. Rev.*, 1957, **108**: 1070.
- [34] YANG C N. C. S. Wu's contributions: a retrospective in 2015[J]. *Int. J. Mod. Phys. A*, 2015, **30**: 1530050.
- [35] BROMBERG J. A. Shimony interview[DB/OL]. [2022-05-20]. <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/roal-histories/25096>.
- [36] CLAUSER J F, HORNE M A, SHIMONY A, HOLT R A. Proposed experiment to test local hidden-variable theories[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1969, **23**: 880.
- [37] CLAUSER J F. Early History of Bell's Theorem, Quantum [Un]speakeable: from bell to quantum information[M]. Ed: BERTELMANN R, ZEILINGER A. Berlin: Springer, 2002.
- [38] WICK D. The infamous boundary seven decades of heresy in quantum physics[M]. New York: Springer, 1998.
- [39] KASDAY L R, ULLMAN J D, WU C S. Angular correlation of compton-scattered annihilation photons and hidden variables[J]. *Il Nuovo Cimento B* (1971-1996), 1975, **25**: 633.

- [40] LAMEHI-RACHTI M, MITTIG W. Quantum mechanics and hidden variables: a test of Bell's inequality by the measurement of the spin correlation in low-energy proton-proton scattering[J]. *Phys. Rev. D*, 1976, **14**: 2543.
- [41] LEE T D, YANG C N. Question of parity conservation in weak interactions[J]. *Phys. Rev.*, 1956, **104**: 254.
- [42] 施郁, 物理学之美: 杨振宁的科学贡献 [J], *低温物理学报*, 2022, **44**: 1.
- [43] LEE T D, OEHME R, YANG C N. Remarks on possible noninvariance under time reversal and charge conjugation[J]. *Phys. Rev.*, 1957, **106**: 340.
- [44] GELL-MANN M, PAIS A. Behavior of neutral particles under charge conjugation[J]. *Phys. Rev.*, 1955, **97**: 1387.
- [45] GOLDBERGER M, LEE T D, YANG C N. Decay modes of a $(\theta+\bar{\theta})$ system[J]. *Phys. Rev.*, 1958, **112**: 1796.
- [46] INGLIS D R. Completeness of quantum mechanics and charge-conjugation correlations of theta particles[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1961, **33**: 1.
- [47] DAY T B. Demonstration of quantum mechanics in the large[J]. *Phys. Rev.*, 1961, **121**: 1204.
- [48] SHI Y. High energy quantum teleportation using neutral kaons[J]. *Phys. Lett.*, 2006, 75.
- [49] SHI Y, WU Y L. CP measurement in quantum teleportation of neutral mesons[J]. *Euro. Phys. J. C*, 2008, **55**: 477.
- [50] HUANG Z, SHI Y. Extracting rephase-invariant CP and CPT violating parameters from asymmetries of time-ordered integrated rates of correlated decays of entangled mesons[J]. *Euro. Phys. J. C*, 2012, **72**: 1900.
- [51] SHI Y. Exact theorems concerning CP and CPT violating in $C = -1$ entangled state of pseudoscalar neutral mesons[J]. *Euro. Phys. J. C*, 2012, **72**: 1907.
- [52] SHI Y. Some exact results on CP and CPT violations in a $C = -1$ entangled pseudoscalar neutral meson pair[J]. *Euro. Phys. J. C*, 2013, **73**: 2506.
- [53] HUANG Z, SHI Y. CP and CPT violating parameters determined from the joint decays of $C = +1$ entangled neutral pseudoscalar mesons[J]. *Phys. Rev. D*, 2014, **89**: 016018.
- [54] SHI Y, YANG J. Time reversal symmetry violation in entangled pseudoscalar neutral charmed mesons[J]. *Phys. Rev. D*, 2018, **98**: 075079.
- [55] SHI Y, YANG J. Entangled baryons: violation of inequalities based on local realism assuming dependence of decays on hidden variables[J]. *Euro. Phys. J. C*, 2020, **80**: 116.
- [56] SHI Y, YANG J. Particle physics violating cryptononlocal realism[J]. *Euro. Phys. J. C*, 2020, **80**: 861.
- [57] JAMMER M. The philosophy of quantum mechanics: the interpretations of quantum mechanics in historical perspective[M]. New York: John Wiley and Sons, 1974.
- [58] LEE T D. Are black holes black bodies?[J]. *Nucl. Phys. B*, 1986, **264**: 437.
- [59] BELL M, GOTTFRIED K. John S Bell on the foundations of quantum mechanics[M]. ED: VELTMAN M. Singapore: World Scientific, 2001.

Historic Origin of Quantum Entanglement in Particle Physics

SHI Yu^{1,2*}

1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
2. CAS Center for Excellence in Quantum Information and Quantum Physics,
University of Science and Technology of China, Shanghai 201315, China

Abstract: The historic origin of quantum entanglement in particle physics is studied systematically and in depth. In 1957, Bohm and Aharonov noted that the 1950 Wu-Shaknov experiment had realized the discrete version of the Einstein-Podolsky-Rosen correlation. Indeed this experiment was definitely the first experimental realization of spatially separated quantum entanglement in history. Such an experiment had been proposed by Wheeler, as a test of quantum electrodynamics, but his calculation was erroneous. The correct theoretical calculations were made by Ward and Pryce and also by Snyder, Pasternack and Hornbostel. The entangled state of the photons also satisfies the selection rule of C. N. Yang in 1949. After the publication of Bell inequality in 1964, discussions on whether Wu-Shaknov experiment can be exploited in testing the inequality inspired the progress of this field, and a new experiment was done by Wu's group. In 1957, Lee, Oehme and Yang established the quantum mechanical formulation of the kaons, and discovered that neutral kaon is a two-state system. The following year, Goldhaber, Lee and Yang wrote down entangled states of a pair of kaons for the first time, in which each kaon is allowed to be charged or neutral, as the entanglement in internal degrees of high energy particles beyond photons written down for the first time. In 1960, as an unpublished work, Lee and Yang discussed an entangled state of a pair of neutral kaons. Such entangled kaons widely exist in meson factories later on. Several physicist are also introduced, especially Ward.

Key words: electron-positron pair; entangled photons; pseudoscalar meson; entangled mesons; kaon

* E-mail: Yu_shi@ustc.edu.cn