

通过计算磁通量子寻找狄拉克磁单极子

取一超导线圈,把它放在极低磁场的装置中,并用超导量子干涉器件监视其电流达几个月之久。这就是斯坦福大学卡布拉勒为探测运动磁单极子所做的实验。1982年2月14日他发现了符合于一个狄拉克磁荷单位的事件。1982年4月16日他在大统一理论第三讨论会上谨慎低调地作了他可能发现磁单极子的报告,使与会者们震惊。一位知名的理论学家评论说:“我们想来挑剔却留下了赞赏,这是给人印象十分深刻的事件。我们不应该根据单一事件就信服,但这是给人印象最深刻的单一事件。”

磁单极子的存在是由狄拉克于1931年在试图说明最小电荷 e 的存在时提出的。狄拉克的量子化条件表明单个磁极强度 g 必须由下列关系所限制: $eg = \hbar c/2$ 。1948年狄拉克证明,如果磁荷存在,那末必须存在一个最小电荷,否则量子力学的完整性,特别是角动量量子化将被违反。在1981年12月的里雅斯坦举行的磁单极会议筹备会上,狄拉克说,“现在我倾向于相信磁单极子不存在,因为许多年过去了,在实验方面没有任何进展。”1975年普赖斯等报导在宇宙射线中发现两倍于狄拉克强度的磁单极子,而且质量至少为200倍质子质量。普赖斯小组后来撤回报告。

卡布拉勒探测单极子的方法是应用超导体中的磁通量子化。由磁通量子 $\phi_0 = \hbar c/2e$ 给出磁荷的直接测量。卡布拉勒的仪器是4匝直径为5cm的铌线圈,轴线沿垂直方向放置。线圈由一对缠绕着的导线与SQUID磁力仪输入线圈连接。如果单个狄拉克磁荷通过线圈,通过超导电路的磁通将有 $8\phi_0$ 的变化。(见图1)。

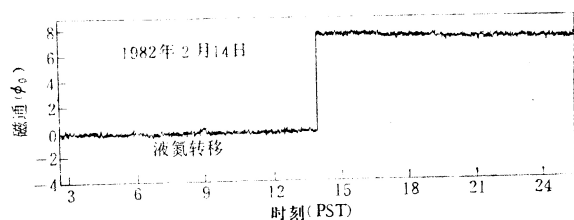


图1 卡布拉勒所发现的可能的磁单极子事件

SQUID和线圈放在直径为20cm长为1m的圆柱形超导屏蔽内部,并在底部密封。超导屏蔽外部是单个 μ 合金圆筒把地磁场减小到几个毫高斯。组合屏蔽提供对外磁场变化的180db隔离度,从而使环境磁场为 5×10^{-8} 高斯。在这个圆筒中一个磁通量子将产生大约 3×10^{-9} 高斯的磁场。所以卡布拉勒告诉我们,圆筒有少许不成对的涡流。卡布拉勒在他的哲学

博士论文研究中曾用过类似的极低场装置。

作超导屏蔽 卡布拉勒取一可膨胀的铝箔厚为60 μ m折叠成细长条状物并把它冷却到液氮温度。当铝箔容器成为超导时,它就阻挡环境磁场。然后卡布拉勒用一机械泵把铝箔膨胀成圆筒,并仍然保持它处于液氮温度。在膨胀期间,于膨胀前占据容积的磁场由于在表面上感生超电流便从容积中排出,在铝箔容器中剩下一较低磁场。尽管由于折叠的外形有一些残余磁场存留在屏蔽内部,在圆筒内部只有较外部磁场低10—100倍的磁场。然后,卡布拉勒采取第二个折叠屏蔽带置于冷管中,他让热的氦气通过玻璃管,然后缓慢地减少流量因此内部屏蔽经过它的转变温度而冷却。因为内部屏蔽处于原先膨胀的屏蔽所提供的较低磁场之中,因而获得更低的磁场。他继续这种自举过程,在3或4次膨胀之后装置内部的磁场降低到 5×10^{-8} 高斯。然后卡布拉勒把它的仪器通过气闸放进这极低磁场中。

4匝线圈是一个翻转线圈,可在绕组平面上旋转180°(供绝对磁场定标用)。卡布拉勒已把这个装置用于测量 $\hbar/m_e$ 实验。在他的单极子研究中,他把线圈放在其轴线与屏蔽轴线相一致的固定位置上。

在1982年5月中旬以前,卡布拉勒已经监视在超导线圈中的直流电流达200天,仅看到一个可选的事件——记录于2月14日星期日下午1:53,在实验室无人的时候。卡布拉勒在一个半小时以后读记录时发现了这一事件。

在《物理评论快报》中,卡布拉勒指出这事件符合于单个狄拉克磁荷通过的过程,其综合不确定度在 $\pm 5\%$ 以内,这是在各种记录的事件中最大的。他总共发现了27个超过 $0.2\phi_0$ 限度的事件,这是排除像液氮和氮迁移一类已知干扰以后所留下来的。他规定至少

在前一小时和后一小时意义明确的稳定水平有明显偏差时才算一个事件。运转时间的70%实验室无人,在这期间只有6个事件被记录下来。

误差来源 讨论探测器假信号的可能来源,卡布拉勒说由两次电源停电所引起的线性电压的涨落和伴生瞬变过程并不引起可检测的

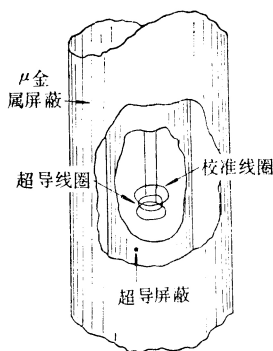


图2 单极子探测装置

偏差。当接通探测器工作时从热油泵的马达电刷发出射频干扰不能产生任何偏差。线圈没有达到临界电流，因临界电流比这电流的 1000 倍还要大。在 2 月 14 日这一天没有地震干扰发生。

是否由于高能宇宙射线击中导线导致这段导线成为正常态？卡布勒拉说这样的射线穿过导线时能存储 1GeV/cm 能量，使导线局部温度升高大约 0.01K 。但是要达到临界温度必须有 5K 的变化。

卡布勒拉曾经故意机械地产生感应偏差，例如用起子的柄撞击探测器，在 25 次以上的试验中有两次产生偏差达 $6\phi_0$ ，但是这种信号不足以混淆卡布勒拉告诉我们的那个单极子事件。那种偏差通常有一个尖峰并持续时间达数小时。

卡布勒拉认为发生混淆单极子过程的原因仅是自生的内部应力所产生的机械作用。如果线圈中匝与匝间移位，电感将变化并产生一个电流变化。电感中有 1% 移位就能够混淆事件。

卡布勒拉说对于单个狄拉克磁荷通过，他的信噪比达 15:1。1970 年阿尔瓦雷斯和他的合作者的实验对单个狄拉克磁荷单独通过是不灵敏的，所以他们把月球尘埃样品循环几次通过超导线圈以增加信噪比。卡布勒拉告诉我们，与其他磁单极探测相比，这类实验的优点是具有任意速度和质量的带有磁荷的粒子对实验的作用都是相同的。耦合只是通过长程电磁场。虽然他现在的低带宽的系统不能辨别预期的单极子的速度（大约 $10^{-3}c$ ），为研究所作的若干 SQUID 系统已经作成具有足够的带宽。

改进实验 卡布勒拉等人正在建造一个具有三个互相垂直的绕在球形硼硅酸玻璃壳上的线圈的新探测器。和翻转线圈不同，三个线圈的结构是高度机械稳定的。假设有单极子通过这些线圈，大约轨道的 70% 将切割至少两个线圈，而提供符合信息。总面积为翻转线圈的 10 倍。因为卡布勒拉还能够探测到近距的没有穿过的轨道，因为它们处在极低场屏蔽中产生了场的变化，所以得到有效探测面积的一个附加因子 5。卡布勒拉预期其小组在本月（1982 年 6 月）初将用新装置获得数据。

卡布勒拉强调他已报告的事件“还不是一个发现。它只是一个有意义的事件。我们正在用新装置努力工作，以确切地判断是不是存在这种粒子。仅仅有一个数据点而过分夸张是不合适的。但这个事例也很难去掉。我们碰在刀口上”。

理论 在 1974 年特胡夫特和 A. M. 波尔雅科夫独立地说明如果有一半单的非阿贝规范群，并在一定能量标度上受到自发破缺，这样的理论有对应于狄拉克磁单极子的解。他们进一步说明单极子的质量等于对称性破缺的特征能量标度除以精细结构常数。同一年，乔治·奎因和温伯格证明对于一大类大统一理论，

统一的能量标度——强、弱和电磁耦合强度成为相等的标度，大约是 10^{14}GeV 。所有的大统一理论预言磁单极子质量是一百倍于统一能量标度，即 10^{16}GeV 。

如果现在单极子存在的话，大概在很早的宇宙中即约在大爆炸之后 10^{-35} 秒，当统一的相互作用分裂为强、弱和电磁作用的时候它们就已经产生。卡布勒拉由局域“遗漏质量”给出单极子质量密度的观测上限。这个限度是在 $0.03-0.05$ 太阳质量/立方秒差距的范围内。可以假设因为单极子太重，其速度不大于 300km/sec 。（正如阿尔瓦雷斯所说，只是在原子旁穿过，只有一点点或没有电离发生）。卡布勒拉估算通过地球表面的单极子数为 $4 \times 10^{-10}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}\text{ster}^{-1}$ ，这样磁通量通过他的线圈每年产生 1.5 个事件。

在 1969 年帕克指出，如果单极子分布于整个银河系，它们将从银河系磁场吸收能量，并很快破坏这个场。某些论述认为单极子集中于局部区域，但产生这种集中的机制是困难的。1982 年 4 月在大统一理论讨论会上，格拉苏提到由他、戴莫波洛斯等人所提出的思想。他们推测到达地球的单极子流是来自太阳。阿尔瓦雷斯推测，假设那些测量是正确的，在太阳中单极子必须有大于 10^{12}GeV 的质量，尽管它们有相互排斥作用，但还能由于引力的吸引而保持在一起。阿尔瓦雷斯还推测，单极子也可能集中于地球中心。不能希望把单极子放在桌子上并对它作实验。如弗兰普顿指出“由于它的巨大质量，桌子支撑不住，地球的引力大于单极子与典型的原子间的电磁力，所以单极子总是直线通过。”

（陈文升编译自《PHYSICS TODAY/JUNE 1982》

马中骥校）