

磁单极子纵横谈

史永基

自然界是具有对称性的，描述自然规律的物理定律也必然是具有对称性的。但是，麦克斯韦电磁场方程却是不对称的，这或许反应了电磁理论的不彻底性。1931年，狄拉克预言了磁单极子的存在，成功地解释了电荷的量子化，实现了电磁场方程的对称性。然而，半个多世纪以来，许多理论物理学家和实验家利用各种方法从各个方面都没有寻找到磁单极子。1982年，凯布雷拉报告了尚未得到证实的唯一的磁单极子事例，引起了低温和高能实验、粒子理论、宇宙学和天文物理学等方面专家的极大兴趣。关于磁单极子的研究又活跃起来。

(一) 磁单极子的各种理论模型

磁单极子问题是个古老的问题。早在公元1269年，佩列格利纳斯就讨论了磁单极子问题，首次提出了磁极和力线的概念。伟大的磁学家希尔伯特深入研究了佩列格利纳斯的概念。麦克斯韦在他的电磁统一理论中也曾考虑到磁极问题，但由于缺乏实验证据而在他的最后的电磁场方程中没有出现磁极。1931年，狄拉克预言了磁单极子的存在，他所得到的结果就是现在著名的量子化条件：

$$eg = n(\hbar c/2)$$

式中 e 和 g 分别是电荷和磁荷， n 是主量子数。磁荷比电荷大 70 倍。这样大的磁荷意味着：当迅速运动着的磁单极子通过物质时，应引起物质的深度电离，而且它只能束缚于某种形式的物质。但是，狄拉克没有研究磁单极子的许多其它性质，例如，磁单极子的大小、形状、质量、宇称、自旋、统计法、来源、丰度等。

在狄拉克以后的许多关于磁单极子的研究工作中，假定了磁单极子的质量可与其它粒子相比较，也有相反的意见，这时磁单极子的运动速度可接近于光速，利用磁单极子的韧致辐射去激发，可用光学方法探测契仑科夫辐射和跃迁光子。由于磁单极子通过物质时能量损失很大，所以很快就终止下来。一旦静止，磁单极子便附着在物质之中。这样的磁单极子不但可能在宇宙线中找到，而且也可以用适当高能量的加速器产生。

1974年波列雅可夫和特胡夫独立地证明了磁单极子是作为自发破缺规范场方程的稳定解出现的，这也是许多理论的要求。他们的重要理论结果对当代磁单极子的研究有深刻的影响。

将强、电和弱力统一起来的大统一理论 (GUT) 认为，在充分高的能量或温度下，例如早期的宇宙，强、电

磁和弱力之间没有区别,因为那时宇宙具有完全的对称性,这时磁单极子的典型能量为 $10^{16} \text{ GeV} (\sim 10^{-8} s)$. 当宇宙膨胀时,它的温度降低,标量希格斯场可具有非零期待值. 希格斯场的迅速减弱导致了拓扑缺陷,这些缺陷就是磁单极子,它的典型质量约为 $\sim 10^{16} \text{ GeV}$, 而一个质子的质量约为 $\sim 1 \text{ GeV}$.

这样大质量的磁单极子只能在宇宙大爆炸后的一瞬间产生. 标准宇宙学和 GUT 推论出的磁单极子数约等于核子数. 但是,当核子构成宇宙中所观察到的物质时,每 10^{15} 个质子必定少一个磁单极子,银河系磁场的存在意味着磁单极子更少. 1981 年左右,拉扎利德斯等估计的磁单极子通量 $\leq 10^{-16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$.

因为 GUT 磁单极子是非常笨重的,运动速度约为 $1/100$ 光速的磁单极子便很容易穿到地球中去,长 1 km 的最强大的电磁铁只能使磁单极子偏转不到 10^{-8} 度. 因此, GUT 磁单极子模型说明了为什么自狄拉克预言了磁单极子存在以来,一直没有寻找到的原因. 就目前的理论水平,只有一种探测技术可用来寻找磁单极子,这种技术就是动态感应探测器. 凯布雷拉磁单极子事例就是用这种探测器记录的.

(二) 磁单极子源

可能的 GUT 磁单极子源包括: 宇宙大爆炸、磁单极素、银河系、地球表面、太阳、地球内部、陨星、加速器、宇宙线、宇宙线生成物、中子星等. 上述这些源可归纳成六个方面分述如下:

1. 加速器研究: 通常粒子研究可在加速器上进行. 由于磁单极子具有许多奇异的性质,设计无背景加速器实验是不可能的. 目前在固定靶和对碰撞束加速器研究中没有找到磁单极子. 事实上,在所有的情形中,碰撞截面极限是加速器上测量的最小值. 磁单极子规范理论给出了磁单极子的质量下限,它大于该理论中玻色子质量与一个适当耦合常数之比. 对于 30 GeV 中间玻色子质量和精细结构常数,磁单极子的质量为 $10,000 \text{ GeV}$ (注意: 标准弱电统一理论不包括磁单极子.) 现在世界上没有哪个国家的加速器能产生 GUT 磁单极子所必须的能量值 10^{16} GeV . 因此,加速器磁单极子研究不再是主要的,但是仍可继续用于非 GUT 磁单极子的研究.

2. 宇宙线研究: 地球表面总的宇宙线通量约为 $0.01 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. 但是,凯布雷拉报告的通量极限等于这个值的 1 亿倍.

天文物理学估计的磁单极子通量 $< 10^{-15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. 该通量值要求象足球场大小的探测器运转好几年. 电离研究报告的最大面积-时间因子是在 Bakson 中微子探测器上进行的,它产生的通量极限比目前凯布雷拉极限几乎低 10^4 倍.

宇宙线也可以通过相互作用产生基本粒子. 虽然

宇宙线的能量可高达 10^{11} GeV ,但仍不足以产生 GUT 磁单极子.

3. 物质研究: 磁单极子可能存在于物质之中,一种情况是物质形成时堆积在物质中的,另一种情况是磁单极子失去动能后停留在物质中. 磁单极子也可能通过镜像荷束缚于铁磁质、顺磁质或原子核中. 典型地,在星际形成过程中,磁单极子可能残存于核附近.

4. 太阳系源: 由于流星的引力较小,它可能为磁单极子提供一个安全的“避风港”. 但是,俘获磁单极子的流星碰撞到地球上时还可继续前进,因为它的动量远大于正常原子.

太阳也可以作为磁单极子源,它包含 10^{46} 个磁单极子,每秒发射 10^9 个磁单极子. 日辉场发射磁单极子的速度小于地球绕太阳的速度,所以它们在地球轨道上形成磁单极子云. 对太阳所进行的观察说明它具有磁单极子矩,这些测量的表观值与 $\sim 10^{29}$ 净北单极丰度相一致.

GUT 磁单极子模型提出了这样的可能性: 当磁单极子通过核物质时,由于碰撞可引起质子和中微子自发衰变. 换句话说,在磁单极子存在时可以激发重子衰变,通常这种衰变是极端稀少的. 虽然重子激发的可能性引起了许多人的兴趣,但是在具体细节上还存在着许多问题.

磁单极子重子激发为地面实验观察提供了一种重要的可能性. 在 $SU(5)$ 大统一理论中,预言的质子寿命为 $\sim 10^{31}$ 年,所以对它的探测需要大量的物质. 另一方面,通过质子衰变探测器磁单极子可能以强相互作用截面激发几次衰变,以这种激发可能性为基础,地面上磁单极子通量的上限应 $< 5 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ (假定截面为 $\sim 100 \text{ mb}$).

5. 天文物理源: 中子星应是相当好的磁单极子源. 磁单极子的通量约为 $< 5 \times 10^{-22} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$,这个值远低于其它几种通量极限. 磁场中的自由磁单极子将使场中性化,因为产生场的电流必须对磁单极子做功,因而消耗了电流. 这意味着自由磁单极子通量极限为 $< 10^{-16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$; 或者大体上比凯布雷拉通量小 10^{15} 倍. 最近,作为磁单极子质量和速度的函数又重新详细地研究了该通量极限. 即使对于质量为 10^{19} GeV 的磁单极子也难以获得 $> 10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 的通量.

6. 大爆炸源: 大爆炸磁单极子之谜已有许多讨论. 标准宇宙学和 $SU(5)$ GUT 给出的磁单极子数大体上与宇宙中的中子数相同. 估计的宇宙中总质子质量与闭合宇宙所需要的很接近. 如果再加上巨大质量的等量磁单极子,那么宇宙将非常迅速地闭合起来. 这意味着不可能有那么多的磁单极子.

减少磁单极数的方法之一,最引人入胜的大概是膨胀宇宙假说. 实际上,宇宙是指数式地膨胀和过冷

实际的宇宙膨胀速度是巨大的,这种膨胀过程消除了它的先前历史.在相变出现以后,宇宙重新变热,并沿着标准大爆炸线扩展开来.

(三) 探测超重磁单极子的方法

磁单极子的存在和性质可由它们与物质的相互作用导出.用来探测荷电粒子的大部分技术对于 GUT 磁单极子都存在一些问题.因此,我们应当仔细地探讨探测超重磁单极子的各种可能的方法.

1. 感应法:当穿过导电环的磁通改变时,环中便感生出电流.这种电流由于环材料的电阻而很快衰减.当粒子穿过环时,持续的电流只能由磁单极子产生.电流的符号取决于磁荷的极性及其穿过回路的方向.未穿过环的电荷或磁偶极子以及磁荷将只能引起很小的瞬时电流变化.

因为变化着的环境磁通穿过回路时也将感生出变化的电流,所以要用超导屏蔽将环境磁场冻结起来.屏蔽本身与回路相互作用因而减少了偏离电流,相互作用的程度取决于屏蔽与回路间的距离.凯布雷拉事例可能是由穿过环的环境磁通的变化引起的.非超导探测技术也已提出.超导回路、屏蔽和超导量子干涉器件的组合看来可能提供最好的探测灵敏度.

2. 电离法:涉及荷电粒子的几种电磁相互作用过程导致了可探测的光子和伴生的粒子能量损失.磁单极子间的模拟相互作用得益于较强的磁荷,但所期望的巨大的 GUT 磁单极子的速度远小于光速.

磁单极子光生过程计算表明:原子激发对于磁单极子的探测最有前途.对于 $\beta(=v/c)$ 为 10^{-3} 的 GUT 磁单极子估计的能量损失差几个量级.这种误差对于在各种介质中探测磁单极子的可能性有很大影响.

估计能量损失时的误差源在于原子碰撞是很复杂的.对于相对论荷电粒子,这些固有的复杂性通过将相互作用过程分解成近距碰撞和远距碰撞,可能得到简化.在“近距”碰撞中,能量转移远大于电子的结合能,因而可将电子视为自由的,而冲量是近似满意的.因此,能量损失不难由动力学原理和散射截面计算出来.在“远距”碰撞中,原子的激发可认为是由掠射粒子的扰动电场引起的,因而可利用偶极近似.

一种重要的可能性是感应和电离的组合.如果磁单极子通过这种探测器时在感应事件的几毫秒内探测不到电离信号,那么由电离损失估计的可靠性和感应信号是可疑的.如果发现伴随电离,那么磁单极子的速度可以确定,因而可以给出磁荷的极性.

3. 声学法:10 年以前,霍夫斯塔特提出并用实验证明了电子束可以产生机械振荡和可探测的热声波.尽管这种原理很重要,但始终没有利用该原理建立起粒子探测器,因为信噪比太低.由于早期估计的磁单极子的能量损失约为 2GeVcm^{-1} 使人们对声学探测方

法重又感到兴趣.但是,热胀落压力的计算表明:当传导介质的温度高于几毫度时便限制了磁单极子的热声探测.伴随实际声测量的噪声源也很大.为了研究声学探测方法的可行性,实验工作仍在继续进行.

4. 电磁法:在 50 年代,利用高空探测气球收集了几个不寻常的事例,能量大于几 TeV,但又没有粒子径迹.这些不寻常的事例被解释为虚磁单极子-反磁单极子对的光生,它们的韧致辐射和湮灭辐射是可见的.但加速器研究没有发现这种类似的事例.

随着 GUT 磁单极子模型的出现,对单极子-反单极子系统(称为磁单极子素)又重新作了研究.磁单极子素具有一些显著的性质.当正反磁单极子相距 $1/10 \text{ \AA}$ 时,它的寿命长达 10^{11} 年.相距 1 \AA 时,轨道磁单极子的速度为 $1\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$,主量子数约为 10^{12} ,但结合能仍为 40keV .磁单极子素通过经典拉莫尔辐射衰变.它的去激发过程是:首先是无线电辐射,其次是连续光辐射、X 射线、 γ 射线、夸克、胶子和中间玻色子,最后是能量为 10^{14}GeV 的 GUT 玻色子.总共可以发射几千万个粒子.波长为 1cm 的磁单极子素辐射时可产生 $10^{-24}\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{Hz}^{-1}$ 的通量,可观察的电流极限约为 $3 \times 10^{-16}\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{Hz}^{-1}$,它对应于 $50\mu\text{Jy}$.

综上所述,磁单极子是一个很重要的研究课题.如果磁单极子的存在被最后证实,这不仅对于物理学,而且对于其它自然科学和哲学都将具有深远的影响.