

磁单极子存在吗?

董宝中

(中国科学院高能物理研究所)

一、关于磁单极子存在的理论依据

1931年 P. A. M. Dirac^[1] 在寻求电荷的量子化的解释时,预言了单个磁极的存在,并给出了电荷与磁荷的关系:

$$g = n\hbar c/2e = nc(137/2) \\ = ng.$$

其中 \hbar 是约化普朗克常数; n 是一个非零的整数; c 是光速; e 表示电荷; g 表示磁荷; $g_0 = 68.5e$ 是单位磁荷。

Dirac 的论断对磁单极的理论研究和实验寻找工作起了重要的推动作用。但是许多年里没有一个实验物理学家找到磁单极子存在的证据。

在长期的实验寻找失败之后,在理论研究上却有了若干新的进展。1974年荷兰的 G. 't Hooft^[2] 及苏联的 A. M. Polyakov 各自独立地发现基本粒子相互作用理论(如规范场论),这些理论不仅允许而且要求磁单极子的存在。规范场理论还指出,磁单极子必须比我们曾经看到过的或预言过的任何粒子的质量都要大得多。也正因为这样,以前的实验没有探测到磁单极子是不奇怪的。

稍后发展起来的基本粒子相互作用的大统一模型也要求磁单极子的存在,并预言磁单极子的质量为 10^{16}GeV (或约为 $20ng$)。

这样一个超重的磁单极子将只能在宇宙诞生时的大爆炸发生后的 10^{-35} 秒钟内产生。只有在那时才有足够的热量(几乎达到 10^{30}K) 来产生磁单极子。北磁单极子和南磁单极子都将形成。它们中的一小部分将合到一起湮没掉,

物理

大部分则将免于湮没的命运。

最近,欧洲核研究中心(CERN)的 G. Lazrides^[3] 等人的理论研究给出了磁单极子与质子的比率的极限:约1比 10^{20} 。预期每平方公里的面积上每年约有200个磁单极子通过。

这个理论第一次对磁单极子的质量和通量同时作出了估计。这些估计(虽然是粗略的)为实验工作者指出了新的探索领域。

如上所述,多年理论研究的结果表明,磁单极子是存在的!当然,最后还有待于实验的证明。

如何能发现磁单极子呢?只有通过磁单极子与物质的相互作用才能觉察到磁单极子的存在。磁单极子与物质的相互作用有什么特点呢?在这方面人们也作了不少的工作。

二、磁单极子与场和物质的相互作用

1. 磁单极子与磁场的相互作用

磁单极子在磁场中会受到磁场的吸引和加速。在真空的磁场中,磁单极子的能量增加率为

$$2.06 \times 10^4 (g/g_0), \text{ 单位是 } \text{eV/G} \cdot \text{cm}.$$

其中 g_0 是单位磁荷, g 是磁单极子的磁荷。

可以看出,磁单极子在磁场中的能量增加率比电子在电场中的大得多。

2. 磁单极子在物质中的能量损失

1977年 S. P. Ahlen^[4] 由理论上得到较精确的磁单极子在物质中电离损失的公式。图1是利用 Ahlen 的公式计算的磁单极子在 Lexan 一种聚碳酸脂树脂的商用名)中电离损失 (dE/dx) 随 $\beta(\beta = v/c)$ 值变化的曲线。可以看出

磁单极子的电离损失比一般带电粒子的大得多。当 β 不太小时, 电离损失的变化不大, 而且随着 β 值的减小, 电离损失也减小。当 $\beta \rightarrow 0$ 时, 电离损失亦趋于零。

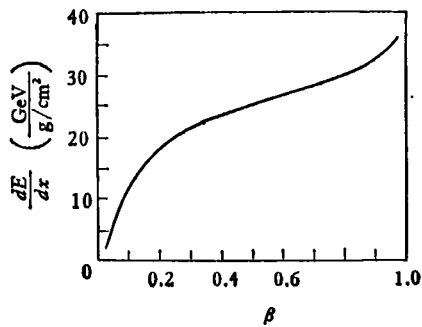


图1 带 $2g_0$ 磁荷的磁单极子在 Lexan 中的电离损失与 β 的关系曲线

人们利用核乳胶和塑料片做的固体径迹探测器来探测磁单极子。根据磁单极子具有强电离损失的特点, 很容易将磁单极子的径迹与其他带电粒子的径迹区分开。

三、寻找磁单极子的实验

要寻找磁单极子, 首先要知道如何能得到磁单极子。人们根据以往的经验假设: 足够高能量的粒子与物质相互作用将会产生磁单极子, 一方面利用高能加速器加速的粒子与物质相互作用来寻找磁单极子; 另一方面在宇宙线中寻找磁单极子。宇宙线与地球高层的大气物质相互作用会产生磁单极子对, 其中一部分磁单极子由于极性的关系射到空间去了, 另一部分磁单极子则沿地磁场方向射向地面, 如图 2(a) 所示。N. A. Porter^[5] 又指出, 不仅宇宙线与地球大气作用可能产生磁单极子对, 而且宇宙线本身就可能含有磁单极子, 特别是宇宙线的高能部分(例如大于 10^{17} eV), 如图 2(b) 所示。这些磁单极子是被星系磁场加速到如此高的能量的。

下面我们对实验方法略加介绍。

1. 磁收集法

1951年 W. V. R. Malkus^[6] 设计了在宇宙射线中寻找磁单极子的装置。装置原理图如

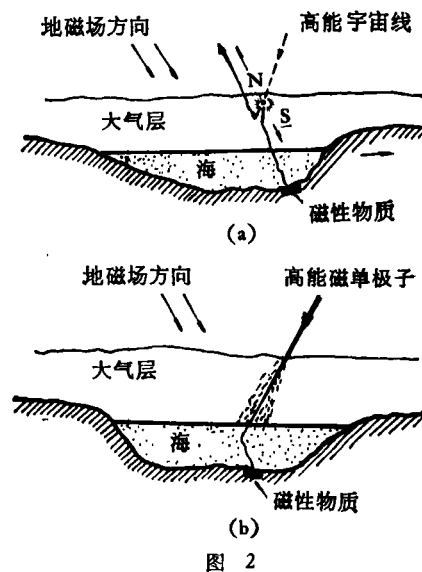


图 2

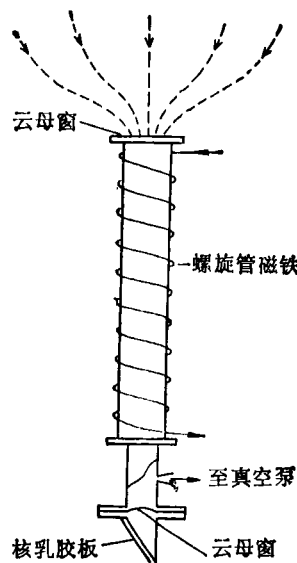


图3 Malkus 实验装置示意图

图 3。

Malkus 认为, 如果宇宙线与高层大气作用产生磁单极子, 则磁单极子被大气慢化后将沿着地磁场的磁力线方向运动, 最后落到地面。用一垂直放置的螺旋管电磁铁就可以吸引这些磁单极子, 并使其通过螺旋管。磁场还可以把磁单极子加速到一定的能量。获得一定动能的磁单极子在通过装置底部的核乳胶片时会留下特有的径迹。由于电磁铁的磁场高于地磁场,

使地磁场的磁力线在电磁铁处有个相对的集中，这就增加了磁单极子的收集面积。该实验的有效接收面积为 8300 cm^2 ，实验时间共为 $1.2 \times 10^6 \text{ s}$ ，因此得到的时间·面积因子为 $10^{10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ 。实验中没有发现磁单极子的径迹，只得到宇宙线中磁单极子的流强上限：小于 $10^{-10} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。

2. 直接收集法

1973年 P. B. Price^[7] 等人用气球将切伦科夫辐射器 (Cerenkov Radiator)、乳胶片和由 33 层 Lexan 组成的总厚度为 1.6 g/cm^2 ，面积为 20 m^2 的粒子径迹探测器 (如图 4 所示) 直接带到高空探测磁单极子。经过 2.6 天后收回探测器。他们对探测器中的粒子径迹分析后，宣称发现了一个磁单极子的径迹，这个磁单极子带有 $2g_0$ 磁荷，质量至少为质子质量的 200 倍。

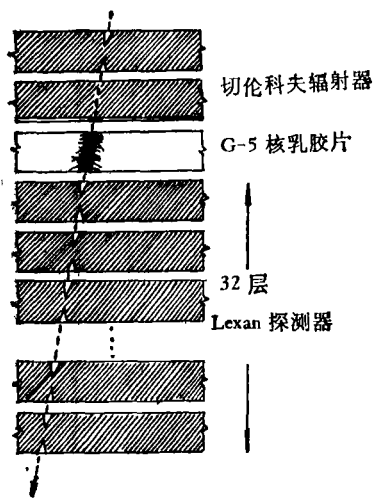


图 4 Price 实验用径迹探测器断面示意图

这个结果在 1975 年发表后曾引起很大的轰动。不少的人对这实验数据提出异议，认为这径迹可能是其它的高电荷原子核引起的。后来，Price 等人又重新仔细地处理了数据，1978 年他们重新发表了修正的数据和结果^[8]，承认了 1973 年得到的那个径迹可能是某些其它类带电粒子或原子核产生的，而不是磁单极子留下的。

在美国斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 的命名为 PEP 的 e^+e^- 对撞机上寻找磁单极子的

物理

实验用的也是直接收集法^[9]。

3. 用磁场从物质中拔取

人们认为宇宙线中的磁单极子的含量是很少的，直接探测很困难。同时又认为，宇宙线中的磁单极子经过大气、海水等的慢化后会在磁性物质中积累起来。这些物质的作用就相当于一个磁单极子收集器。如果我们用这些物质作实验样品，便可以大大提高面积·时间因子，从而得到宇宙线中磁单极子流强的更低的上限。当然，如果磁单极子不能在磁性物质中积累起来，这类实验也就失去了作用。

这类实验最初是由东京大学的 E. Goto^[10] 提出和进行的。

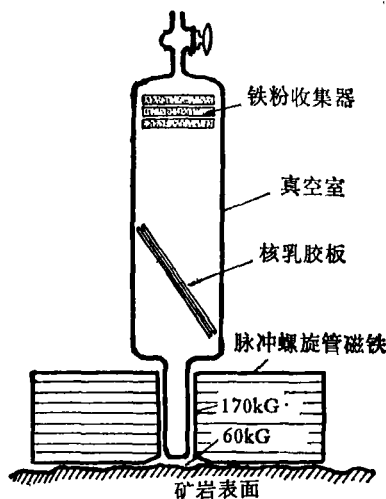


图 5 Goto 实验装置示意图

图 5 为 Goto 实验装置的示意图。实验所用脉冲螺旋管磁铁是便携式的，磁铁中心的峰值场可达 170 kG 。磁铁直接安放在要探测的露天铁矿石的表面，在铁矿石表面的磁场可达 60 kG 。在矿石表面下一英寸处磁场约可达 30 kG 。磁铁的内径为一英寸，中心放置一个玻璃真空室，真空室的直径向上增加为 3 英寸，有 12 英寸高。中间放置两块用黑纸包着的核乳胶板，板与装置的中心线成 25° 角。当有磁单极子从磁铁矿中拔出时，它会沿磁场方向运动并加速，通过乳胶板，在板中留下特别粗黑的径迹。装置的上部是三块 $3/8$ 英寸厚的铁粉

表 1 寻找磁单极的实验与结果

实验者 (时间)	加速器			源		实验方法	可探测的 磁荷范围 (以 g_0 为单 位)	可探测的最大质量 (置信度 90%) (以质子质量为单位)	实验结果			
	能量 (GeV)	质子数	样品		物质中磁单极子 含量上限 (90% 置信度) (磁单极子/核子)				磁单极子流密度上限 (90% 置信度) (个/cm ² ·s·Sr)	产生截面上限 (单位 cm ²) (置信度)		
			来源	质量 (g)								
W. V. R. Malkus ^[61] (1951)						磁收集法	小于 1 到 3	10 ³		3.6 × 10 ⁻¹¹		
E. Amaldi 等 ^[11] (1961)	25-28	4.5 × 10 ¹³				磁场拔取	小于 3	3.0				6 × 10 ⁻⁴⁴ (95%)
E. Goto 等 ^[60] (1963)			露天磁铁矿	~5 × 10 ³		磁场拔取	小于 1 到 3	4 × 10 ³	~8 × 10 ⁻²⁸	3.8 × 10 ⁻¹⁶		
W. C. Carithers 等 ^[17] (1966)						磁收集法	小于 1 到 3	7 × 10 ³		5.3 × 10 ⁻¹⁵		
R. L. Fleischer 等 ^[12] (1969)			深海锰矿 结核	7.7 × 10 ³		磁场拔取	小于 1 到 60	1.3 × 10 ⁴	5.2 × 10 ⁻²⁸	7.5 × 10 ⁻¹⁹		
H. H. Kolm 等 ^[13] (1971)			深海沉积物	~1.5 × 10 ³		磁场拔取	1/6 到 220	1.4 × 10 ⁴	~3 × 10 ⁻²¹	6.1 × 10 ⁻¹⁹		
L. W. Alvarez 等 ^[15] (1971)			月岩样品	8.3 × 10 ³		超导线圈感应	小于 1 到 ∞		4.8 × 10 ⁻²⁸			5.1 × 10 ⁻⁴² (95%)
R. A. Carrigan 等 ^[14] (1974)	400	5.7 × 10 ¹⁶				磁场拔取	1/30 到 24					
R. R. Ross 等 ^[20] (1973)			月岩样品	11.5 × 10 ³		超导线圈感应	小于 1 到 ∞		3.3 × 10 ⁻²⁸			
D. Fryberger 等 ^[9] (1981)	质子能 量 29	e ⁺ , e ⁻				直接收集	0.3 到 2.9					0.9 × 10 ⁻³⁶ (95%)
B. Cabrera ^[16] (1982)						超导线圈感应	小于 1 到 ∞			0.53 m ² · Sr ⁻¹ · d ⁻¹		

收集器，用于收集由磁铁矿中拔出来的磁单极子。

Goto 在露天铁矿的 1000cm^2 的面积上作了寻找磁单极子的实验。在实验用的核乳胶中没有发现可与理论上预言的磁单极子能量损失率比较的径迹。考虑到岩石的腐蚀速度（腐蚀 1cm 岩石要 100 到 1000 年），取岩石在宇宙线中暴露的时间为 300 年，实验得到的面积·时间因子约为 $10^{13}\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。由此得到在宇宙线中磁单极子流强上限约为 10^{-13} 磁单极子/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。

在加速器上寻找磁单极子的实验（如在 Brookhaven, Berkeley, CERN 和 Fermi 等实验室进行的），也用了类似这样的方法。他们用物质将加速的粒子与靶作用产生的次级粒子流慢化或俘获后，再用磁场把磁单极子拔取出来并加速到一定能量，最后通过探测器（如核乳胶片，气体闪烁体等）探测^[11-14]。实验结果列于表 1。

由于拔取磁单极子所需的磁场强度是随磁单极子所带的磁荷增加而增加的，故 Goto 的实验方法对有限的磁场所能探测的磁荷的范围是有限的。另外，所能探测的磁单极子的质量也是有限度的。这是因为在有限大小的磁场中磁单极子所能获得的能量是有限度的。如果磁单极子的静止质量大于某个限度，它的运动速度就可能太慢，以至失去了它的高电离的特性（磁单极子在物质中的电离损失是随 β 值趋于零而趋于零的），这时无法用核乳胶、塑料片等固体径迹探测器探测磁单极子了。一般这方法可探测的磁单极子的质量不超过 10^5GeV 。

4. 超导线圈感应探测

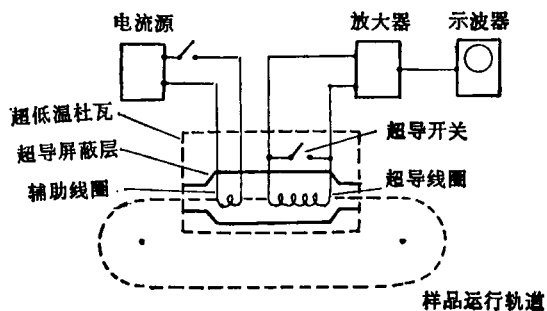


图 6 Alvarez 实验装置示意图

物理

七十年代初 L. W. Alvarez^[15] 等人利用超导回路制成磁单极子探测器。这种探测器与固体径迹探测器不同，它对所探测的粒子的质量和速度没有限制，只要粒子带有磁荷就可以被探测到。这种探测器的原理图如图 6 所示。

这装置的核心部分是由超导线圈和超导开关组成的超导回路，放在超低温容器内。为了避免外磁场的干扰超导线圈外面加了超导屏蔽层。超导线圈的中心留有室温孔道，好让被测量的样品通过。

当样品通过超导线圈时，如果样品中含有磁单极子，就会引起线圈中磁通量的变化。从而产生感应电流。这感应电流的大小是与线圈中磁通量的变化相联系的。那么当样品反复通过超导线圈 N 次后，闭合超导回路中的电流变化为

$$\Delta I = Nn\Phi/L,$$

其中 Φ 表示磁单极子的磁通量； n 表示超导线圈的匝数； L 表示超导线圈的自感； ΔI 表示闭合的超导回路中电流的变化； N 是样品通过超导线圈的次数。

当样品循环通过超导线圈时，与线圈并联的超导开关是接通的，组成一闭合回路。当切断超导开关时，流过超导线圈的电流可以通过电子学仪器测量。比较样品通过超导线圈前后测量到的信号差就可以知道线圈中电流的变化，从而探测到样品中是否含有磁单极子。

L. W. Alvarez 等人用这种仪器对阿波罗 11 号登月飞船取回的共 8.3kg 的月岩样品进行了寻找。结论是没有发现磁单极子存在。测量的误差是 $(\frac{1}{8})g_0$ 磁荷。得到的磁单极子丰度的上限是 4×10^{-4} 磁单极子/ g 或 4.8×10^{-28} 磁单极子/核子。

这种方法虽然对所探测的磁单极子在磁荷和质量的大小上没有限制，但是如果宇宙线中的磁单极子由于质量太大或别的原因不能在磁性物质中积累起来时，则实验的目的也不能达到。有人认为如果磁单极子具有 10^{16}GeV 的质量，那么由于地球引力的作用，磁单极子将不能

停留在地表和地壳的物质中。

1982年斯坦福大学的 B. Cabrera^[16] 宣称, 当年的2月14日在他的磁单极子探测器中发现了一个带单位 Dirac 磁荷的粒子的事例。这是他在经过151天的连续观察后得到的唯一的一个事例。

B. Cabrera 使用的是与 L. W. Alvarez 等人用的相似的装置, 只是他不使用物质样品, 而是直接探测宇宙线中的磁单极子。他用一个由超导材料铌制造的直径为5cm的螺旋管线圈(共四圈)做接收线圈。线圈与地面垂直放置。这线圈与一超导量子干涉器件(SQUID)的磁强计的超导输入线圈相连。利用 SQUID 磁强计来测量接收线圈内磁通量的微小变化。SQUID 和接收线圈放在一个直径为20cm, 长为1m带底的圆柱超导磁屏蔽层内。最外边是高导磁率合金的磁屏蔽层。采取这样的屏蔽措施后, 装置内部的本底磁场为 5×10^{-8} G。

带单位磁荷的磁单极子通过单圈的超导环

路时引起磁通的变化为

$$\Phi = 4\pi g_0 = 4\pi\hbar c/2e = 2\Phi_0,$$

其中 $\Phi_0 = hc/2e = 2 \times 10^{-7} \text{G} \cdot \text{cm}^2$ 是磁通量子; \hbar 是普朗克常数; e 是电子电荷; c 是光速。

Cabrera 所得到那个事例测到的磁通量的变化是 $8\Phi_0$ (如图7所示)。这正好相当于一个带单位磁荷的磁单极子通过有四圈的超导线圈时所引起的磁通量的变化。

Cabrera 给出穿过地球表面的磁单极子流强的上限为 $0.53 \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

这只是某种巧合, 还是真正有一个磁单极子通过了 Cabrera 的实验装置的接收线圈? 这还有待于进一步的实验验证。Cabrera 自己也强调他所报道的只是一个有趣的事例, 而不能认为是确凿的发现。他们已建造了一台新的装置, 并已开始工作, 以便证明是否真正存在磁单极子。

Cabrera 的新装置有三个相互垂直的超导

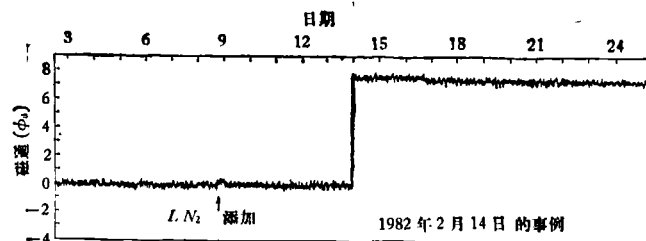


图7 B. Cabrera 实验记录的事例

线圈, 这线圈绕制在一个球型的 Pyrex 玻璃泡上。与原来的线圈相比, 新的超导线圈具有更高的机械稳定性。而且假定有磁单极子通过时, 约70%的粒子轨道将至少穿过两个超导线圈。这样可以提供符合的信息, 更好地排除外界干扰, 接收面积也加大了。新的超导线圈的面积是旧线圈的10倍。

磁单极子的存在与否关系到人们对电与磁的关系、宇宙的形成和发展、基本粒子的构造和相互作用等等重大物理问题的认识。因此, 磁单极子的寻找是物理学家们很感兴趣的一个课题。相信在不久的将来物理学家对此将作出明确的回答。

参 考 文 献

- [1] P. A. M. Dirac, *Proc. Roy. Soc. A*, **133**(1931), 60; *Phys. Rev.*, **74**(1948), 817.
- [2] G. 't Hooft, *Nucl. Phys. B*, **79**(1974), 276.
- [3] G. Lazarides et al., *Phys. Lett.*, **100B** (1981), 21.
- [4] S. P. Ahlen, *Phys. Rev. D*, **17** (1978), 229.
- [5] N. A. Porter, *Nuovo Cimento*, **16**(1960), 958.
- [6] W. V. R. Malkus, *Phys. Rev.*, **83**(1951), 899.
- [7] P. B. Price et al., *Phys. Rev. Lett.*, **35**(1975), 487.
- [8] P. B. Price et al., *Phys. Rev. D*, **18** (1978), 1382.
- [9] D. Fryberger et al., *Phys. Rev. Lett.*, **48**(1982), 77.
- [10] E. Goto et al., *Phys. Rev.*, **132**(1963), 387.
- [11] H. Bradner et al., *Phys. Rev.*, **114**(1959), 603.

(下转第134页)