

进展

磁单极子探测的历史和现状

周新霖1*, 田文武1,2,3、朱辉1、吴丹1、崔晓红1、张建立1、张孟飞4、张少博1,2、 雷贤欢1,2, 程皓麟1,2,3

- 1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;
- 2. 中国科学院大学研究生院, 北京 100101;
- 3. 西藏大学物理系, 拉萨 850013:
- 4. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210023
- *联系人, E-mail: zhouxl@nao.cas.cn

收稿日期: 2021-07-26; 接受日期: 2021-09-03; 网络出版日期: 2021-10-20

国家重点基础研究发展计划(编号: 2018YFA0404202, 2018YFA0404203)和国家自然科学基金(编号: U1931111, U1938112)资助项目

自1931年狄拉克提出磁单极子存在的理论猜想以来,磁单极子探测成为了物理学家和天文学家共同研 摘要 究的重大课题. 历史上曾经有人声称探测到磁单极子, 但是没有获得可重复的实验结果. 最近, 欧洲大型强子 对撞机(Large Hadron Collider)实验限制了磁单极子的质量下限约为0.5 TeV. 当代还有许多大型地面/地下实验, 如MACRO, IceCube, Auger等探测来自宇宙的磁单极子, 获得了不同速度范围的磁单极子的流量上限. 本文总结 已有的磁单极子探测结果,并讨论利用我国高海拔宇宙线观测站LHAASO项目探测磁单极子的可能性. 最后,建 议建造一个探测磁单极子的卫星或者空间站载荷.

磁单极子,宇宙线,天体粒子物理,高能粒子交互作用

PACS: 14.80.Hv. 26.40.+r. 13.85.-t

引言

麦克斯韦建立电磁场方程是19世纪物理学的一个 辉煌成就, 在麦克斯韦的电磁场理论中, 自由磁荷是不 被允许的. 然而, 如果粒子状的自由磁荷, 称为磁单极 子存在,能够自然地解释电荷是量子化的基本事实. 狄 拉克1931年最早提出了磁单极子存在的理论猜测. 狄 拉克认为带有磁荷的粒子能够存在于狄拉克弦的末 端,基本磁荷和电荷存在关系[1]:

$$eg = n\hbar c/2, \tag{1}$$

其中, g是磁荷, $g = ng_D$, n取1, 2, 3, ..., $g_D = \hbar c/2e$, 称 为狄拉克单位磁荷.

在狄拉克最初的磁单极子猜想中,对磁单极子的 质量没有限制,但有一个简单的估计.这个估计基于一 个基本假设,就是磁单极子的半径和电子经典半径相 等. 暂时还没有任何实验或者观测的结果支持这一点. 因此这只是一个假设. 在这个假设条件下[2],

引用格式: 周新霖, 田文武, 朱辉, 等. 磁单极子探测的历史和现状. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 119521

Zhou X L, Tian W W, Zhu H, et al. Detection of magnetic monopoles: History and current status (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51:

$$r_{\rm M} = g^2/m_{\rm M}c^2 = r_e = e^2/m_e c^2.$$
 (2)

因此 $m_{\rm M}=n2.4~{\rm GeV/c^2}$. 这可以看作是磁单极子的一个质量下限. 大统一理论预言了磁单极子的存在. 大统一理论预言, 在极早期的宇宙中基本相互作用的自发破缺产生的态跃迁可以产生非常重的磁单极子, 达到 $10^{26}~{\rm eV}$, 称为超大质量的磁单极子. 这个质量超出了现有高能物理研究的范围. 作为对照, 已知的最高的宇宙线能量大约是 $10^{20}~{\rm eV}$. 而原始的大统一理论在低能尺度引入二级对称破缺机制, 可以产生中等质量的磁单极子(Intermediate-Mass Monopoles, IMMs), 质量约为 10^{11} – $10^{20}~{\rm eV}$ ^[3]. 这个质量的下限已经达到现有最大加速器欧洲大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)的能量($10~{\rm TeV}$), 也已经进入了宇宙线和天体粒子物理的研究范围, 因此, 可能在宇宙观测中发现, 也可能在LHC的实验中搜索信号.

低速的磁单极子可能处于引力束缚的状态,可能引力束缚于整个星系/银河系,或者太阳、地球等天体,有非相对论性的维里速度.中等质量的磁单极子,可能通过星系以及星系际磁场,乃至致密天体(比如脉冲星/磁星)等加速到相对论速度.

中国天体物理学家彭秋和及其合作者自1984年以 来发表了"磁单极天体物理学"的系列研究论文, 在理 解磁单极子相关的天体物理效应方面成果丰硕. 他们 认为, 磁单极子催化核子衰变产生的Rubakov-Callen效 应[4,5], 可以作为活动星系核和类星体以及银河系中 心的一种新的能源机制[6]. 他们最近指出, 2013年在银 河系中心方向发现的相当强的径向磁场, 在定量上同 他们2001年论文[6]中的理论预言完全相符, 这可能是 磁单极子存在的天文观测证据[7]. 进一步地, 彭秋和及 其合作者又指出, Rubakov-Callen效应作为能源可以自 然地解释近百年来天体物理学和宇宙学的一些疑难问 题[8], 如核心坍缩型超新星爆发(包括伽马射线暴)的 物理机制,地球(以及木星、土星)核心处于热熔状态 的物理机制, 白矮星为何不会冷却(即从未观测到表 面温度低于3000°C的白矮星)的物理原因, 宇宙热大爆 炸的物理机制[9]. 这表明磁单极子在天体物理学中扮 演非常重要的角色,可以自然地解决百年来自然科学 界的重大迷惑问题. 这些工作凸显磁单极子相关的物 理过程的重要性, 拓展了"磁单极子探测"这一课题的 内涵.

2 磁单极子搜索历史

历史上曾经有人声称探测到宇宙的磁单极子. 1975年Price等人[10]发现宇宙射线在他们的高空气球搭载的感光胶片上留下了一道重重的印迹, 他们认为是磁单极子留下的. 经分析, 这个粒子的质量大于200个质子, 磁荷约等于137个基本磁荷. 然而有人给出了另一种解释, 观测结果可能是由于铂核分裂造成的. 因此, 这个无法重复的结果没有被广泛认可为磁单极子存在的证据.

Cabrera [11]设计了一个导线绕成的超导线圈,用来测量通过它的磁通量.如果一个磁单极子通过这个线圈,将会出现一个正的或者负的磁荷信号.如果一个磁偶极子通过线圈,将会获得一个正的再加一个负的磁荷信号.这样就可以区分磁单极子和磁偶极子.1982年2月14日,实验装置记录到了一个单向信号,随即他们建成了更大的线圈探测设备.然而,磁单极子信号再也没有出现.有人认为最初的信号可能只是一次机械位移造成的.

曾经有人尝试利用电磁感应技术检测束缚在物质中的磁单极子. 他们检测了很多奇异的物质, 比如海水、奇异的矿石、陨石、月岩等, 都没有发现磁单极子的踪迹. 通过这些检测, 获得了一个严格的磁单极子/核子数目上限比例, 约<1.2×10⁻²⁹ [12].

还可以追踪历史上磁单极子在地球矿物质上留下的痕迹. 地球上古老的云母矿,已经有约4.6亿年的历史. 云母矿石的性质类似于现在的核径迹探测器,如果磁单极子在历史上曾经穿过云母片,会留下径迹. 但是检测古老的云母矿,都没有发现磁单极子的踪迹. 这可以对速度 $\beta = v/c$ 在3×10⁻⁴和1.5×10⁻³之间的磁单极子获得一个流量上限,大约为10⁻¹⁶–10⁻¹⁷cm⁻²sr⁻¹s⁻¹[13].

当代已经有很多地面和地下大型实验搜索磁单极子,比如MACRO, IceCube, Auger等 [3]. 对非相对论的低速磁单极子的最强的流量限制来自意大利MACRO实验 [14],对 $\beta = v/c$ 在4×10⁻⁵-0.5之间的磁单极子获得一个流量上限为1.5×10⁻¹⁶ cm⁻² sr⁻¹ s⁻¹. IceCube对 $\beta = v/c \sim 0.9$ 的磁单极子得到一个流量上限约为4×10⁻¹⁸ cm⁻² sr⁻¹ s⁻¹ [15,16]. 超高能宇宙线Auger实验也没有探测到超相对论磁单极子,获得了对超相对论磁单极子流量最好的限制,大约为<10⁻¹⁹ cm⁻² sr⁻¹ s⁻¹ (洛伦兹因子为10⁹) [17]. 这些流量上限低于帕克限制(Parker

Bound). 帕克限制代表了穿过银河系磁场所能获得的最大的磁单极子流量,数值为< 10^{-15} cm⁻² sr⁻¹ s⁻¹ [18]. 但是原初版本的帕克限制没有考虑关于银河系磁场的最新进展,因此有改进的帕克限制(Extended Parker Bound),数值为< $10^{-16}(M/10^{26}$ eV) cm⁻² sr⁻¹ s⁻¹ [19],包含磁单极子质量M. 对于相对论和超相对论的中等质量磁单极子,这个数值低于当前实验获得的流量上限.

图 1展示了现有各种实验探测结果在90%置信度区间内对磁单极子流量上限的限制^[17]. 意大利MACRO实验在磁单极子的低速区域获得了有用的流量上限^[14]. IceCube实验在相对论速度区域获得了最低的流量上限^[16]. Auger实验在超相对论的高速区域获得了最低的流量上限^[16].

2.1 MACRO实验简介

MACRO实验是位于意大利地下的多目标实验. 探测器位于地下深处, 被厚厚的岩石所覆盖. 因此能够屏蔽绝大多数的宇宙线缪子背景和天然放射性背景. 在地下实验室的宇宙线缪子背景水平为1 m⁻² h⁻¹, 是地面水平的10⁻⁶. 只有最小能量1.3 TeV的缪子能够到达地下探测器. MACRO实验采用模块化结构, 由

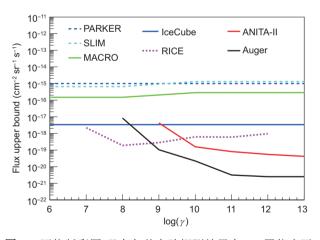


图 1 (网络版彩图)现有各种实验探测结果在90%置信度区间获得的从低速到超相对论速度的磁单极子流量上限^[17]. 绿实线指示MACRO实验结果^[14]; 蓝实线指示IceCube结果^[16]; 黑实线指示Auger结果^[17]

Figure 1 (Color online) The upper limits on the flux of magnetic monopoles (90% C.L.) from low velocity to ultrarelativistic velocity taken from the experiments [17]. MACRO results are denoted by the green solid line [14]; IceCube results are denoted by the blue solid line [16]; Auger results are denoted by the black solid line [17].

6个12.6 m×12 m×9.3 m的探测器构成, 探测器总的体积为75.6 m×12 m×9.3 m.

一个磁单极子穿过探测器的信号强烈地依赖速度 β . 比如一个 β 为10⁻⁴的磁单极子穿过探测器的飞行时间(Time of Flight)大约是1 ms. 因此针对不同速度的磁单极子,6个模块采用不同的探测器硬件系统和操纵系统,以获得一个比较大的磁单极子速度覆盖范围,从 $\beta \sim 4 \times 10^{-5}$ 到接近1. 这些探测器都没有探测到磁单极子信号. 不同的探测器硬件配置获得不同速度的磁单极子的流量上限. 当然MACRO实验对高速磁单极子的限制敏感度远不如其他超高能宇宙线探测实验(比如Auger, 参考图 1), MACRO实验在低速区域获得了有用的磁单极子流量上限 [14].

2.2 IceCube实验结果

IceCube是一个位于南极冰层中的中微子望远镜. 它通过探测穿过冰层的宇宙中微子产生的契伦科夫光来工作. IceCube于2010年12月完工. 它有5160个数字光学模块, 排列成86个垂直的线列, 冻结在冰面1500–2500 m深处, 覆盖总体积约1 km³. 探测磁单极子的实验在IceCube只完工了20%的时候就进行了. 结果没有探测到磁单极子信号, 对于速度为 $\beta = v/c \sim 0.9$ 的磁单极子, 获得90%置信度水平的流量上限为< 4×10^{-18} cm $^{-2}$ sr $^{-1}$ s $^{-1}$ [15]. 在IceCube完工之后, 又用整个的IceCube装置进行了磁单极子探测的实验, 对于速度 $\beta = v/c > 0.51$ 的磁单极子获得的流量上限为< 1.55×10^{-18} cm $^{-2}$ sr $^{-1}$ s $^{-1}$ [16].

2.3 Auger实验结果

皮埃尔奥格天文台(Pierre Auger Observatory)是当前世界上最大的超高能宇宙线观测装置.它位于南半球的阿根廷西部小镇马拉格附近,覆盖了3000 km²的面积,包括一个表面探测器阵列(SD)和一个荧光探测器阵列(FD). SD由1660个水契伦科夫探测器组成,排成一个三角形状,工作周期接近100%. SD探测地面附近由超高能宇宙线导致的大气簇射产生的次级粒子. FD由24个望远镜组成,覆盖区域和SD相同. FD探测由大气簇射粒子穿过大气时激发氮气分子产生的紫外荧光. FD只能在晴朗的无月夜观测,工作周期只有约15%.

超相对论磁单极子可以产生大气簇射. 磁单极子的电磁交互已经被深入研究^[20]. 超相对论的磁单极子在空气中的电磁能量丢失是洛伦兹因子的函数. 在洛伦兹因子小于10⁴时碰撞能量丢失是主要的. 更高的洛伦兹因子时, 电子对产生和光子核子交互是主要的能量丢失途径. 由于磁单极子质量很大, 韧致辐射被极大地压制了.

为了研究磁单极子诱导的大气簇射,需要在大气簇射模拟软件CORSIKA里加入考虑磁单极子交互的软件包CONEX [21]. 在这个软件包里, 缪子碰撞丢失, 正负电子对产生和光子核子交互已经被适当地修改了. 为了描述磁单极子交互, 交互截面和一个因子 $(1/2\alpha)^2$ 成比例, α 是精细结构常数. 一个超相对论的磁单极子会把大部分能量释放在大气中.

一个天顶角为70°的超相对论磁单极子的纵向方向的簇射轮廓和一个标准的10²⁰ eV的超高能质子宇宙线的簇射轮廓是有区别的. 磁单极子的大气簇射表现出了更大的能量沉淀和更深的纵向发展. 磁单极子的能量丢失并不依赖于能量, 而是依赖于洛伦兹因子. 搜索超相对论的磁单极子采用了Auger从2004到2012年的数据. 只有同时被SD和FD探测到的事件数据才被采用. 因为FD探测器能够辨别超高能质子宇宙线和磁单极子不同的纵向轮廓, 可以确证是否探测到磁单极子. 因此只有少量的数据能采用.

实验结果中所有事件符合一个纯的质子超高能宇宙线的蒙特卡罗模拟结果,表明没有探测到超相对论的磁单极子. 根据这个空的结果,可以导出一个90%置信度水平的超相对论磁单极子的流量限制. 对于洛伦兹因子为10°, 大约为< 10⁻¹⁹ cm⁻² sr⁻¹ s⁻¹ [¹⁷]. 随着Auger曝光时间的延长,还可能获得更深的限制.

除了Auger,还有其他几个实验如RICE, ANITA-II等也搜索了超相对论的磁单极子^[3].这些实验都没有探测到超相对论的磁单极子.由于设备性能的差异以及宇宙线背景的不同,获得的磁单极子的流量上限不太一致, Auger获得了最低的流量上限(参考图 1).

2.4 探测地磁场的单极成分

宇宙中的磁单极子在运动过程中可能被天体(如恒星、行星等)俘获. 尤其对于低速的磁单极子, 存在被地磁场俘获的可能性. 地球附近总的磁流量和地球

包含的总磁荷成正比. 因此,可以利用卫星测量地磁场的单极成分. 欧洲Swarm卫星组合包含三颗卫星,发射于2013年. 它们分布于地球高度较低的近极轨道,每秒测量一次局部地磁场矢量. 利用Swarm卫星组合六年的数据, Bai等人 [22]计算了地球表面的地磁场中包含的磁单极成分的强度上限为 B_m < 0.13 nT (95%置信度),这个数值大约为地磁场强度的2 × 10^{-6} .

2.5 加速器实验结果简介

现有最大的粒子加速器, 欧洲的LHC产生的粒子能量大约为10 TeV数量级, 因此不可能在现有的加速器上研究超对称大统一理论预测的超重的磁单极子(10²⁶ eV). 然而, 对于中等质量的磁单极子, 仍然可能在LHC上搜索它们的信号, 给出限制. 已经有理论工作预测磁单极子可能在粒子碰撞中产生. 有两种机制可以产生磁单极子, 一种是Drell-Yan-like (DY)机制中的S通道中间态, 另一种是光子聚变的t通道^[23,24]. 具体地阐述这些理论模型^[3]超出了本文的范围, 总之, 理论工作已经预测了可能有磁单极子在质子碰撞中产生.

LHC由欧洲核子研究组织(法语: Conseil Européenn pour la Recherche Nucléaire, CERN; 英语: European Organization for Nuclear Research)在原有的大型电子对撞机(Large Electron Positron Collider)的周长27 km的隧道中建成. 这个隧道位于法国和瑞士边境,接近日内瓦. LHC主要碰撞质子,也碰撞重离子. LHC已经执行对撞了中心能量位于7,8,13 TeV的质子,已有两个运行周期,分别为RUN1 (2010—2012)和RUN2 (2015—2018).

ATLAS是LHC上最大的一个圆环状的多目标粒子探测器^[25]. 在LHC上直接搜索磁单极子信号是通过ATLAS和CMS^[26]实验搜索双光子和多光子事件进行的. 此外, LHC建造了一个专门的实验装置MoEDAL (Monopole and Exotics Detector at the LHC)^[27]研究可能的新物理, 特别是磁单极子. MoEADAL结果和ATLAS以及CMS实验互相补充. ATLAS对低磁荷的磁单极子敏感, 而MoEDAL对高磁荷的磁单极子有更严格的限制. 这些实验结果都没有探测到磁单极子信号,给出了磁单极子存在的质量下限. 基本上, 存在质量小于0.5 TeV或者更大一些(比如1 TeV)的磁单极子的可能性被排除^[23,24]. 磁单极子精确的下限质量依赖

于粒子自旋和磁荷数目. 磁荷为2-3的磁单极子质量下限也会比磁荷为1的磁单极子大一些, 但是更高磁荷的磁单极子质量下限反而会下降. 由于磁单极子和光子的耦合作用, 通过加速器实验计算磁单极子具体的作用截面是不可靠的^[3].

3 LHAASO实验探测磁单极子

我国第一个宇宙线研究领域的大科学装置,高海拔宇宙线观测站项目LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory),位于高海拔地带四川稻城,平均海拔4410 m,是世界上最高的宇宙线观测装置.将地面粒子阵列KM2A结合大型水契伦科夫望远镜WCDA,以及广角契伦科夫望远镜阵列WFCTA,覆盖一个宽的能段范围从40 GeV到PeV,在高能段(>30 TeV)实现世界最高的灵敏度^[28].

考虑到超高能宇宙线事例(1020 eV)的发生率, 大 约1 km $^{-2}$ yr $^{-1}$, LHAASO阵列的面积大约有1.3 km 2 . LHAASO每年大约能探测到一个到几个超高能宇 宙线事例. 而与此相对照, Auger有3000 km², 但是 海拔高度低于LHAASO. 粗略地, 探测超高能宇宙 线事例的探测率LHAASO要比Auger低大约3个数量 级. LHAASO能不能探测磁单极子? 如果有超相对 论的磁单极子产生的大气簇射扫过LHAASO阵列上 方, LHAASO当然能够探测到计数. 类似于Auger探 测的内容, 磁单极子产生的大气簇射和普通的质子 超高能宇宙线产生的大气簇射形状是有区别的. 有 可能区别磁单极子和普通超高能质子产生的大气簇 射. 然而LHAASO探测到超相对论的磁单极子的概 率比Auger低, 鉴于Auger十多年的运行也没有探测到 超相对论的磁单极子,需要特别的机缘,LHAASO才 可能探测到磁单极子产生的奇异的大气簇射. 但 是LHAASO运行较长时间以后, 仍然可以对超相对论 的磁单极子流量给出一个限制,这个限制要比Auger高 接近2个数量级. 原因是Auger的面积比LHAASO大3个 数量级、考虑到Auger工作周期只有15%(取决于FD探 测器只能无月夜工作),同时海拔高度比LHAASO低, 因此LHAASO可能获得比Auger高2个数量级左右的磁 单极子流量限制.

但是实际上, LHAASO和Auger可能对应了不同的能量范围. Auger有效面积很大, 但是其表面探测器

(SD)排布很稀疏, 只能探测极高能(能量为10²⁰ eV)的 宇宙线, LHAASO KM2A虽然面积远小于Auger, 但是由于其电磁粒子探测器(ED)和缪子探测器(MD)的 排布远比Auger致密, 因此其对10¹⁵ eV附近的宇宙线探测能力远强于Auger, 相应地, 其对洛伦兹因子较低的磁单极子有可能给出比Auger更好的限制. 另外KM2A中的ED和MD对电子和缪子的鉴别能力也远好于Auger的SD, 因此有可能给出鉴别磁单极子和宇宙线的额外信息. 对于这方面的详细研究设计需要对大气簇射的情况作详细模拟, 远远超出了本文的范围. 让我们期待LHAASO在探测磁单极子方面会有更好的结果.

4 磁单极子探测卫星/空间站载荷的概念 设计

当代的大型地面/地下实验(比如MACRO, Ice-Cube, Auger等)没有能够探测到磁单极子,表明到达地面的磁单极子流量确实是很微小的. 1975年的一次高空气球实验声称探测到磁单极子[10],但是结果没能重复. 有可能宇宙磁单极子流量本身就很微小,还有一种可能就是磁单极子普遍速度比较低,会被地磁场俘获,不能到达地面. 因此我们建议在太空中探测磁单极子. 我们认为,磁单极子探测有必要进入中国空间科学卫星项目或者中国空间站科学实验方案中.

我们建议建造一个磁单极子探测卫星或者空间 站载荷. 初步设想这个未来的空间设备主要包括以 下仪器. (1) 一个或者几个超导线圈的组合(对应不同 方向). 这些线圈将利用电磁感应测量通过它的磁通 量,能够区分通过它的是磁单极子还是偶极子,能够 很灵敏地直接探测磁单极子. (2) 一台在TeV能段灵 敏的宇宙线电子谱仪. 我国暗物质粒子探测卫星"悟 空"(DAMPE)[29]已经在宇宙线电子和正电子谱上发 现了一个1.4 TeV的峰[30], 可能是由于邻近致密天体 源(如脉冲星)的能量注入, 也可能是一个1.5 TeV左右 的未知粒子的湮灭衰变[31]. 这表明了TeV能段的宇宙 线谱还有待进一步探索. 如果能够建造一台在TeV能 段比DAMPE更灵敏的宇宙线电子谱仪,将可能更好地 限制宇宙线电子谱的1.4 TeV峰的轮廓细节,辨别它的 起源,是来自天体源的能量注入,还是未知粒子的湮灭 衰变. 如果是后者, 更高分辨率的数据有可能进一步限 制未知粒子的种类,是暗物质粒子,还是磁单极子,或者其他未知的粒子,从而将具备新发现的可能性. (3) 地磁场测量仪,用来测量地磁场的单极成分. 已知地磁场主要是偶极的,但是如果地磁场俘获了宇宙的磁单极子,会有微小的单极成分. 对地磁场仔细的测量将有助于限制地磁场的单极成分,正如最近的工作进行的初步尝试[22].

5 总结与展望

磁单极子作为一个理论猜想,是各类研究新物理和新天文的实验设备的重要目标.从1931年狄拉克提出磁单极子猜想以来,很多实验和探测都试图搜寻磁单极子的踪迹.有两个实验声称探测到了磁单极子,但是都没有得到重复验证.此后,各类地面/地下的大型实验装置也没有探测到磁单极子,获得了不同速度范

围的磁单极子的流量上限. 大型加速器LHC的实验, 也基本排除了质量小于0.5 TeV的磁单极子的存在. 未来, 基于加速器的实验, 能量进一步提高是很困难的. 宇宙观测将可能在磁单极子探测中给出更强的限制. 大统一理论预言的磁单极子太重, 而各种二级对称破缺机制可以产生10¹¹–10²⁰ eV的磁单极子, 完全位于宇宙线和天体粒子物理的研究能量范围. 鉴于地面的磁单极子流量限制是如此微小, 有可能磁单极子普遍速度比较低, 和维里速度相仿, 会被地磁场俘获, 不能到达地面. 因此我们建议建造一个磁单极子探测卫星或者空间站载荷, 在太空中探测磁单极子.

磁单极子如果能够证明存在,对于物理学和天文学,都有深远的影响.磁单极子相关的物理过程以及天体物理效应将得以广泛研究.这是真正的从零到一的突破,意义不亚于引力波探测,改变我们基本的认知.磁单极子探测如此重要,值得我们一直努力地搜寻.

致谢 感谢中国科学院高能物理研究所王建民研究员的建议. 感谢与LHAASO合作组成员的多次讨论, 使作者受益非浅.

参考文献 —

- 1 Dirac P A M. Quantised singularities in the electromagnetic field. Proc R Soc Lond A, 1931, 133: 60–72
- 2 Giacomelli G, Patrizii L. Magnetic monopole searches. arXiv: hep-ex/0302011
- 3 Mavromatos N E, Mitsou V A. Magnetic monopoles revisited: Models and searches at colliders and in the Cosmos. Int J Mod Phys A, 2020, 35: 2030012
- 4 Rubakov V A. Superheavy magnetic monopoles and decay of the proton. Sov J Exp Theoret Phys Lett, 1981, 33: 644-646
- 5 Callan Jr. C G. Monopole catalysis of baryon decay. Nucl Phys B, 1983, 212: 391–400
- 6 Peng Q H, Chou C K. High-energy radiation from a model of quasars, active galactic nuclei, and the galactic center with magnetic monopoles. Astrophys J, 2001, 551: L23–L26
- 7 Peng Q H, Liu J J, Ma Z Q. Some new possible anticipated signals for existence of magnetic monopoles. New Astron, 2017, 57: 59-62
- 8 Peng Q H, Liu J J, Chou C K. A unified model of supernova driven by magnetic monopoles. Astrophys Space Sci, 2017, 362: 222–238
- 9 Peng Q H, Liu J J, Chou C K. A magnetic-monopole-based mechanism to the formation of the Hot Big Bang modeled Universe. Mod Phys Lett A, 2020, 35: 2050030
- 10 Price P B, Shirk E K, Osborne W Z, et al. Evidence for detection of a moving magnetic monopole. Phys Rev Lett, 1975, 35: 487-490
- 11 Cabrera B. First results from a superconductive detector for moving magnetic monopoles. Phys Rev Lett, 1982, 48: 1378–1381
- 12 Jeon H, Longo M J. Search for magnetic monopoles trapped in matter. Phys Rev Lett, 1995, 75: 1443–1446
- 13 Price P B, Guo S, Ahlen S P, et al. Search for grand-unified-theory magnetic monopoles at a flux level below the Parker limit. Phys Rev Lett, 1984, 52: 1265–1268
- 14 Ambrosio M, Antolini R, Auriemma G, et al. Search for nucleon decays induced by GUT magnetic monopoles with the MACRO experiment. Eur Phys J C, 2002, 26: 163–172
- 15 Abbasi R, et al. (IceCube Collaboration). Search for relativistic magnetic monopoles with IceCube. Phys Rev D, 2013, 87: 022001
- 16 Aartsen M G, et al. (IceCube Collaboration). Searches for relativistic magnetic monopoles in IceCube. Eur Phys J C, 2016, 76: 133
- 17 Aab A, et al. (Pierre Auger Collaboration). Search for ultrarelativistic magnetic monopoles with the Pierre Auger observatory. Phys Rev D, 2016, 94: 082002
- 18 Turner M S, Parker E N, Bogdan T J. Magnetic monopoles and the survival of galactic magnetic fields. Phys Rev D, 1982, 26: 1296-1305

- 19 Adams F C, Fatuzzo M, Freese K, et al. Extension of the Parker bound on the flux of magnetic monopoles. Phys Rev Lett, 1993, 70: 2511-2514
- 20 Wick S D, Kephart T W, Weiler T J, et al. Signatures for a cosmic flux of magnetic monopoles. Astropart Phys, 2003, 18: 663-687
- 21 Bergmann T, Engel R, Heck D, et al. One-dimensional hybrid approach to extensive air shower simulation. Astropart Phys, 2007, 26: 420–432
- 22 Bai Y, Lu S, Orlofsky N. Searching for magnetic monopoles with the Earth's magnetic field. arXiv: hep-ph/2103.06286
- 23 Tanabashi M, et al. (Particle Data Group). Review of particle physics. Phys Rev D, 2018, 98: 030001
- 24 Particle Data Group. The Review of Particle Physics. 2019, http://pdg.lbl.gov/
- 25 Aad G, et al. (ATLAS Collaboration). ATLAS pixel detector electronics and sensors. J Inst, 2008, 3: P07007
- 26 CMS Collaboration. CMS beam pipe to be mined for monopoles. CERN Courier, 2019, 8 March 2019. https://cerncourier.com/a/cms-beam-pipe-to-be-mined-for-monopoles/
- 27 Pinfold J L, et al. (MoEDAL Collaboration). The MoEDAL Experiment—Searching for highly ionizing particles at the LHC. In: Progress in HighEnergy Physics and Nuclear Safety. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. Dordrecht: Springer, 2009. 217–225
- 28 Bai X, et al. (LHAASO Collaboration). The Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) Science White Paper. arXiv: astro-ph/1905.02773
- 29 Chang J, et al. (DAMPE Collaboration). The DArk Matter Particle Explorer mission. Astropart Phys, 2017, 95: 6-24
- 30 Ambrosi G, et al. (DAMPE Collaboration). Direct detection of a break in the teraelectronvolt cosmic-ray spectrum of electrons and positrons. Nature, 2017, 552: 63–66
- 31 Yuan Q, Feng L, Yin P F. et al. Interpretations of the DAMPE electron data. arXiv: 1711.10989

Detection of magnetic monopoles: History and current status

ZHOU XinLin^{1*}, TIAN WenWu^{1,2,3}, ZHU Hui¹, WU Dan¹, CUI XiaoHong¹, ZHANG JianLi¹, ZHANG MengFei⁴, ZHANG ShaoBo^{1,2}, LEI XianHuan^{1,2} & CHENG HaoLin^{1,2,3}

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
²Graduate School, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
³Department of Physics, Tibet University, Lhasa 850013, China;
⁴School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Dirac first suggested the existence of magnetic monopoles approximately 90 years ago. From there onward, experimental detection of magnetic monopoles became an important assignment for both physicists and astronomers. A few unusual events in detecting cosmic magnetic monopoles have been reported. However, there are no repeated events. Most recently, searches for magnetic monopoles with the European Large Hadron Collider excluded the existence of monopoles with masses lower than approximately 0.5 TeV. The searches for cosmic magnetic monopoles with the MACRO, IceCube and Auger experiments found no candidate events in data. The upper limits on the flux of magnetic monopoles from low velocity to ultrarelativistic velocity can be obtained from these experiments. This letter summarizes the existing results from the experimental detection of magnetic monopoles. We also discuss the possibility of searching for cosmic magnetic monopoles with a large high-altitude air shower observatory. Finally, we propose launching a mission to detect cosmic magnetic monopoles in space.

 $magnetic \ monopole, \ cosmic \ ray, \ astroparticle \ physics, \ high-energy \ particle \ interactions$

PACS: 14.80.Hv, 26.40.+r, 13.85.-t **doi:** 10.1360/SSPMA-2021-0210