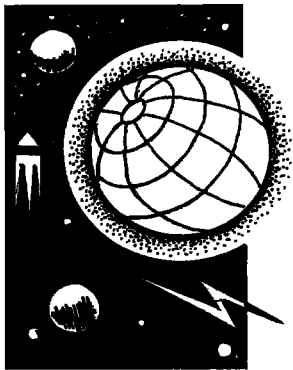


全球电路

金 仲 辉



在晴天,接近地球表面处存在着一个垂直指向地面、大小为100—300V/m的电场。这表明地球表面带有负电荷,

而大气带有净正电荷。那么当一个人站在地面上是否在头部与脚底之间经受了—个200V以上的电势差呢?回答显然是否定的。在日常生活中,这个电场所以并未引起注意是因为我们的躯体和身旁的许多物体(例如树杆等)比之于空气都是良导体,它们短路了电场,使我们感受不到它的影响。但是晴天大气电场是客观存在的。

由于大气中存在着净正电荷,于是它们在晴天大气电场的作用下,形成方向垂直向下的晴天大气电流,将大气中的正电荷输送给地球表面,使全球大气携带的正电荷与地球携带的负电荷中和,造成晴天大气电场消失。然而,实际上晴天大气电场是相当稳定的,这说明全球大气携带的正电荷和地球携带的负电荷也是相当稳定的。因此,一定存在着一些与晴天大气电流相反的电荷输送过程,不断补充大气和地球被中和的电荷,使大气与地球间的电荷输送过程达到动态平衡。

为了解释大气晴天电场,W. Thomson提

出了球形电容器模型,将电离层和地球表面作为电容器的正、负极板。今天,我们知道这个电容器通过大气泄放电流,在全球范围内,这个平均电流约为1000A;而与这个晴天大气电流相反的电荷输送过程有三个,那就是雷暴、太阳风和磁层之间发电机作用以及热电离层中大气潮汐的发电机效应,这三个准直流电源驱动了全球电路,其中雷暴是最强大的电源,它是另二个电源的3倍。雷暴起了准直流电源的作用,首先由C. T. R. Wilson于1920年提出的。为了纪念他,将从雷暴向上流向电离层的电流称为威尔逊电流。威尔逊电流通过电离层扩展到全球,也通过磁层,沿着磁力线扩展到相反的半球,电流返回到地球表面,而如图1所示的云对地闪电,使电荷返回到雷暴,这样就接通了全球电路。图2概括了上述的全球电路过程,也说明了大气各层的位置。

除了上述直流以外,闪电还可激发出超低频电磁辐射,它们的频率是分立的,为8、14、

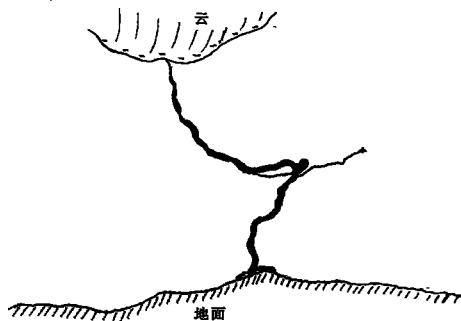


图 1

中国农业大学 北京 100094

我们期待何时能有下一个重大的发现

希格斯粒子是霍夫特和韦尔特曼理论中的一个重要组成部分(图1),至今还没有被实验所证实的。正如先有理论上预言,后被实验证实的其它粒子那样,研究者正等待着希格斯粒子的直接观察。与计算顶夸克质量类似的方法

所得到的计算结果表明,现存的加速器能产生一些希格斯粒子。但只有欧洲核子研究中心(CERN)正在建设中的大型强子对撞机(LHC)才有足够大的功率详细研究新粒子。这需要研究者耐心等待数年才能到来,因为估计到2005年LHC才可能建成。

20Hz……. 这些频率分立的超低频电磁辐射称为舒曼共振,它是由 W. O. Schuman 于 1952 年提出的. 舒曼共振谱可用附有感应线圈磁强计测量,磁强计要安置在远离人工电场干扰的地方.

全球电路是一个老课题,但大气电现象与气候、全球变暖、空气污染等许多问题有关,所以近年来又引起人们的兴趣. 以下我们对全球电路问题作简要介绍.

一、导电的大气层

大气中含有正、负离子,且由于彼此分离产生了大范围的电场,它们强烈地影响着大气的电性质(例如电导率). 30km 高度以下的大气中,离子化的主要源泉是银河系的宇宙射线. 宇宙射线和中性分子间的碰撞产生带正、负电荷的分子,极大多数是氧和氮(在稠密大气中,自由电子几乎是不存在的). 在几毫秒内,这些 $O_2^{+/-}$ 和 $N_2^{+/-}$ 离子经历了离子化学反应,变成了具有几个水分子(典型的是 6 至 8 个,在低温下可多至 20 个)的水化合物,形成了诸如 $NO_3^- (H_2O)_6$ 或 $NO_3^+ (H_2O)_6$ 的“小离子”,这些离子重新组合的寿命典型值为 5 分钟. 如果大气中存在着悬浮微粒,例如雾滴、霾或污染颗粒,小离子将附着在它们身上,形成“大离子”,因而降低了它们的迁移率和大气的电导率. 在云层里的测量已证明,云层里大气电导率值要比云层外同样高度大气电导率值减少 5%.

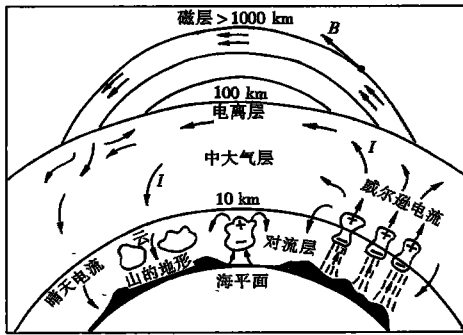


图 2

图 3 绘出了大气层和电离层的电导率廓线. 大气密度随高度按指数衰减或它的 e ——

折尺高度为 7 至 9km. 小离子的迁移率受中性粒子碰撞支配,所以它的电导率大致随高度指数增加,由于在较低大气层里,宇宙射线离子化速率随高度增加的缘故,它具有较小的 e ——折尺高度,约为 5km. 在中层大气层的顶端,即 65km 以上,中性大气密度如此低,以致原有的电子寿命足够长而参与电导,这种变化使电导率增加而迅速进入电离层. 接近地表的大气电导率的数量级为 $10^{-14} s/m$,而在 100km 的高度,大气电导率为 $10^{-3} s/m$,两者相差 11 个数量级.

地面的电导率近似等于电离层低层的电导率. 因为有一个电流从电离层流向地面,电场的高度廓线与电导率的高度廓线相反. 这意味着电场随高度增加而指数减少,大气中含有净的空间电荷. 对于球形电容器模型,应理解成电容器“外极板上的电荷”是分布在整个大气层,而不是集中在一个单球面上. 在晴天大气层里,任何一点以上的电荷累积反比于该点的电导率. 因此,球形电容器的“大气层极板”上的电荷分布是图 3 中电导率廓线的一个镜像.

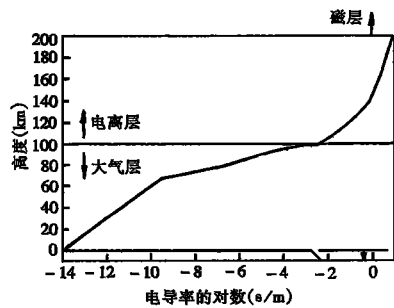


图 3

大气垂直积分电阻率称为大气气柱电阻,它的单位为 $\Omega \cdot m^2$. 电导率随高度增加的结果是大气层的气柱电阻集中于地面附近. 3km 以下大气层的气柱电阻约为总柱电阻的 1/2. 因而海拔高度很高的地面,例如南极洲的内部中央高原处比之于海平面处有较小的气柱电阻. 整个全球来说,地面与电离层之间的大气电阻约为 200Ω . 为了计算球形电容器的电容,两极板的间距必须使用 5km—7km 的高度而不是电

高层的高度。利用球形电容器的公式 $C = 4\pi\epsilon_0 R_1 R_2 / (R_1 - R_2)$, 可计算出它的电容值约为 1F, 它的时间常数在 1000 至 3000 秒范围里

$$T = 1/f = 2\pi RC = 1200s.$$

这个衰变时间很短, 对全球电容器的充电必须几乎是连续的, 否则全球电场将很快消失。

在没有辐射情况下, 麦克斯方程可以化成一简单方程, 它表示了总电流守恒。总电流为云和边界层的机械运动引起的运行电流、传导电流和位移电流之和。边界层就是接近地面的大气层, 在这层中的扰动使边界层大气同地面接触致使它的物理性质变更。由于较低大气有净的空间电荷, 扰动的垂直大气流携带了这层的部分电流。在云的外部 and 边界层以上, 只有被带电的云所产生的静电场驱动的传导电流和被闪电驱动的位移电流才是主要的。

二、发电机和源

在了解全球电路中, 问题是鉴别电路中的主动单元。现在达成共识的是气候系统是主要能源, 但是它的详情难于测定。

大气层电导率对荷电的云, 尤其是高积云的电性质有重要的影响。雷暴的顶端荷正电, 它的典型高度约 12km, 该处大气电导率比恰在地面以上的大气电导率大 10 倍, 云的负电荷约在 5km 的高度, 但电荷集中在云里面, 由于云水珠, 电导率降低了。对这个系统的大气电阻作粗略的估计是有帮助的。半径为 20km、从地面至高度为 10km 的晴天大气圆柱, 它的电阻约为 400M Ω 。然而, 在有云的情况下, 电阻为几千 M Ω 。作个对比, 同样半径的大气圆柱, 从 10km 高度至电离层的电阻为 40M Ω 。从电离层通过全球大气层至地面的电阻约为 200 Ω 。

在大气层中释放一个雷暴, 将必然产生从云顶层进入电离层的威尔逊电流, 并沿着地面和雷暴下全球大气返回。由个别雷暴观测到的传导电流值为 0.09 至 3.4A 之间, 平均值为 1.7A。大约该电流的 1/2 通过上面覆盖的磁层流向相反半球的磁共轭区域(见图 2)。因为从雷暴顶通过大气的放电时间常数比全球电容器的时间常数小一个数量级, 于是部分正电荷最

终储存在球形电容器中。

当一个云底部至大地的闪电发生就接通了全球电路。所有荷电的云都有上述的性能, 唯程度不同而已, 但是非常高的云对全球电路贡献占有更大的份额。在活动的雷暴内, 强烈的上升气流将云颗粒向上运输到生长着雷暴的顶端, 较重的沉淀颗粒滞后在后面, 最后脱离出上升气流。在层顶的小冰颗粒有净正电荷, 在云的较低层的大冰颗粒荷净负电荷。

雷暴将负电荷输送到地球有如下几种方法: 荷负电的云对地闪电、准直流点放电电流、传导电流以及荷负电的沉淀物。前二者的数值比较大, 它们是主要的负电荷输送方式。最经常形式的闪电是云层内的放电, 即云上部和下部荷电区域相接触, 暂时短路形成放电。通常荷负电的云对地闪电发生在较低层的负电荷和地面之间, 这类闪电是全球电路的主要参与者。偶尔也有荷正电的云对地放电, 将正电荷输送到地球。

在发现磁层之前, 将电离层看成是一个等位面, 近代空间研究证明, 这种假设在所有纬度处都是不正确的。由于太阳风和地球磁场之间的发电机相互作用, 造成从黎明到黑夜有 20—100kV 的水平电势差施加到地磁极帽上。横跨极帽电势差通过驱动电流直接耦合到全球电路, 它是全球电路三个主要直流电源之一, 另一个是雷暴和热电离层风。这个水平电势差会影响大气-地球电流和垂直电场, 在磁安静周期内, 在高纬度它们可能改变 20%, 而在地磁暴期间改变更大。

三、监测全球电路

大气电性测量通常使用静电感应方法, 将检测板放置在垂直于电场方向上。由高斯定理知道, 检测板上表面电荷密度 σ 和检测板外的电场强度 E_n 的关系为 $E_n = \sigma / \epsilon_0$, 其中 ϵ_0 为真空电容率。一个接地、转动、附有孔的盘用来遮蔽和暴露检测板, 于是在检测板上产生一个正比于电场强度的交变电压。

连续测量大气电场是由 W. Thomson 于 1861 年在克佑 (Kew) 实验室开始的。如果存在

一个全球电路,那么在地球任何处应该检测到相同的随时间变化的晴天电场.局部地形将增大山顶上的电场,但是电场随时间变化的形状应是相同的,并且应有一个世界时(UT)的依赖关系,这种关系归结为全球雷暴活动.因为大陆在经度上是不规则分布的,雷暴速率不是一个常数.但是,在陆地观测所获得的记录说明,云层复盖、湿度、总悬浮粒子以及垂直对流大气的变化综合在一起成为某地电场变化的原因;它能完全掩蔽了全球起因的电场,只有仔细分析和舍去一些数据,人们才能获得全球电路的线索.

另一方面,在1915—1929年,通过卡内基(Carnegie)号研究船在开放的大洋水面上测定的数据,制定出一个公共的电场随UT变化的依赖关系.只要取得足够的的数据,且有一个好的讯噪比,在大洋任何位置均可检测到这种关系.观测到的全球电场日变化,现在称为卡内基曲线.测量表明在19:00UT时,电场日变化最大.这样响应曲线也可以在海拔高度很高的山顶上,尤其在大洋岛屿上观测到.

近年来大气电性的机载研究,可以避免地球边界层的干扰,气球和飞船用来测量电场上升廓线.因为大气电阻的1/2位于3km以下,所以大部分电势差降落在接近地面的高度,利用外推法可以给出电离层和地面间电势差 V_1 的估计值.在各处同时测量 V_1 ,已说明 V_1 的空间变化在极光下点纬度处要小20%.

可在空中停留超过一星期的气球用来研究大气电场随时间和空间的变化.气球大多数是从南极洲和新西兰上空飞行的.在这些气球上测量了电场的三个轴分量,从而来研究电离层的水平方向电场,在晴天时它稍有衰减.

从这些活动中测得的 $E_{\text{垂直}}$ 数据用来研究全球电路.例如,在1992—1993年炎热的夏天,附有电场和电导率探测仪的六个气球同时在空中,它们横跨地理纬度 28°S 至 80°S ,作了垂直电流的间接测量.电流密度约为 $2 \times 10^{-12}\text{A}/\text{m}^2$,这个数值意味着全球电路的电流约为1000A.好天气下,在极光下点纬度处,经常在所有气球上

同时观测 $E_{\text{垂直}}$ 讯号,与先前结果一致,全球大气电时间常数短至几分钟.这个显著的结果与经典物理图象不一致,它预言至少为10—15分钟.

在1985—1986年南极气球活动期间,地磁安静时间里的电场平均日变化是直流平均值的30%—40%,在接近0300UT时刻有最小绝对值,在接近1800UT时刻达到峰值.在地磁扰动日子里,日调制减少约25%,这与磁层耦合模型的预言是一致的,而与早先的标准范例假设是不一致的.作为对照,在南极洲的Siple站上升一个气球,1980年12月19—20日有强磁暴,发现地磁对 $E_{\text{垂直}}$ 扰动很大,以致根本没有日变化,任何模型无法描述这个结果.

南极洲高原是全球电路大地水平观测的最好场所,因为有70%的时间,高原上的气候是晴天,且由于强的温度倒置和地形的缘故,大气对流受到抑制,导致电场强度和电流密度放大2倍或更多的结果.1991至1992年,E. A. Bering III等人在南极站作了大气电测量.二套相同的仪器相距600m远,每套仪器测量电场强度和大气对地的电流密度.图4(a)是他们在1992年12月中旬的好天气10天里的电场强度数据,由曲线可看出具有逐日变化的每天一个准正弦调制;图4(b)是电场强度季节平均值日变化曲线.由于北半球有更多的陆地形成夏天和冬天之间的差异.因为雷暴主要发生在陆地

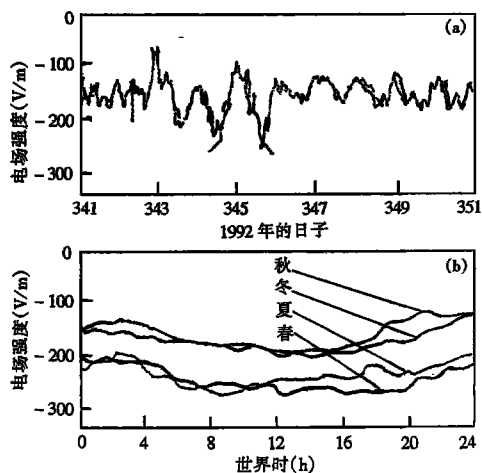


图 4

欢迎订阅《现代物理知识》

《现代物理知识》创刊于1989年元月,是我国物理学界一份优秀的科普杂志.该刊主要介绍现代物理知识、物理学前沿的最新成果与发展动态、与物理学有关的交叉学科发展的信息、有关新技术及其应用,以及科学史和科学家.主要栏目有:物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流和科苑快讯.涉及的学科为:高能物理与核物理,原子分子物理和光物理,等离子体物理,凝聚态物理与材料科学,天文学和宇宙学,以及与物理交叉的其他学科,读者对象为科技工作者、科技管理干部、大、中学校教师、研究生、大学生、中学生和其他物理学爱好者.由于该刊文章具有很强的科学性、知识性和趣味性,因而赢得了广大读者的喜爱,在科技界和教育界有着广泛的影响.

该刊国内外发行,各地邮局均可订阅(邮发代号:2-824).在邮局漏订或需要过去杂志的读者,请按下列价格汇款到《现代物理知识》编辑部(100039,北京918信箱)补订.

1992年合订本,18元;1993年合订本,18元;1995年合订本,22元;1996年合订本,26元;1993年增刊,8元;1994年增刊,8元;1994年附加增刊合订本,36元;1996年增刊,15元;1997年合订本,30元;1998年合订本,30元;1999年合订本,32元;2000年全年6期,每期4元.以上所列,均含邮资或免邮资.

此外,持有该刊1998年第1期的读者,若将这期杂志(未曾残损的)寄给该刊编辑部,该部将按每本10元付酬并十分感谢.

上,这意味着在夏天期间北半球比南半球有更多的雷暴.在不同季节达到最大场强的UT是不同的,这些差异是由最大雷暴活动随经度变化引起的.

四、结束语

将负电荷输送到地面的云对地闪电机制的困难在于平均电场数据的日调制振幅要适度(约为平均值的40%).在经典图象里假设了一个均匀分布的大洋雷暴,但是卫星数据说明这种假设并不正确.

MIT的一些科学家在1993年建立了一个有争论的模型.模型中将全球点放电电流之和以及起电云产生的电晕放电加入到来自闪电活动的电流,这样所得的一个具有调制振幅曲线比较好与卡内基曲线一致.他们得出的结论是,在全球电路中流动着的电流很大一部分更像是由点放电电流携带的,而不是闪电.一个有关的研究认为,如果所有的闪电电动停止,其它的过程可获得的 V_1 值为目前平均值的60%.

另一个争论的新观点是对于平均全球表面

温度来说,全球电路把全球雷暴活动并入到可替代的变量,这些替代变量对全球变暖比之于测量平均全球温度本身更为敏感.已经建立了8Hz舒曼共振发射线的功率、全球电路总电流和全球温度日变化之间的联系.还有,如果 V_1 值的60%来自于起电雨云电流,那么就存在一种可能性,即舒曼共振功率水平和 V_1 测定值组合起来推断全球温度和全球降雨率.虽然上述这些主张尚未被证实,但必然引起人们的兴趣.

全球电路的第三个引起争论的问题涉及到耦合机制,耦合机制给出的电路比对流层被动负载的电路起的作用大.一些科学家再次强调了在太阳-气候耦合中全球电路的作用,并提出由太阳风提供给全球电路的低调制功率被放大到足以影响气候,例如增强了具有全球电路涨落的阿拉斯加海湾的冬天暴风雪.一个成功的模型必须提供约为 10^7 的功率放大因子.

我们已经看到,再度掀起研究全球电路的结果是经典模型不再合适,需要做更多的测量来改善全球电路模型.

(编译自 Physics Today 1998年第10期)