

# 第一章：风起于青萍之末——磁的起源与相对论的初啼

## 引言：旧现象，新视角

在人类对自然的探索中，磁的神秘感或许仅次于引力。一块冰冷的石头（磁铁矿）何以能隔空吸引另一块金属？一根通上电的普通铜线，又为何能让一旁的指南针疯狂舞动？这些看似孤立的现象，背后指向了同一个深刻的物理实在。本章的使命，就是从这些经典问题出发，但以一种全新的、蕴含着未来理论种子的方式去审视它们，剥茧抽丝，一步步揭示磁场的本质，并最终让你瞥见那隐藏在经典幕布后的、由相对论投下的第一缕曙光。

### 1.1.1 宏观电流与安培定则：运动电荷的集体行为

这是磁场最经典、最直观的来源。

#### 【历史回响：奥斯特的偶然发现】

1820年，丹麦物理学家汉斯·克里斯蒂安·奥斯特（Hans Christian Ørsted）在一次讲座中，为了演示电流的热效应，将一根导线连接到电池上。他偶然注意到，当导线中有电流通过时，桌上罗盘的磁针发生了意想不到的偏转。这个简单的课堂演示，首次雄辩地证明了**电可以生磁**，打破了此前电与磁是两种独立现象的普遍认知，为电磁学的统一大业开启了大门。

#### 从宏观电流到微观电荷

奥斯特的实验揭示了宏观的**电流**是磁场的来源。但物理学追求更根本的解释：电流本身是什么？

在金属导线中，电流的微观本质是海量自由电子的**集体定向运动**。我们可以这样理解这个过程：

- 无序的热运动**：在没有外加电压时，金属内部的自由电子像容器中的气体分子一样，在进行着高速、随机的热运动。由于运动方向杂乱无章，从宏观上看，任何方向通过的电子数都相等，没有净电荷流动，因此**不产生电流，也没有磁场**。
- 有序的集体漂移**：一旦在导线两端施加电压，强大的电场力会驱动所有自由电子，在它们原本杂乱的热运动之上，叠加一个朝着特定方向（通常与电场方向相反）的、平均的**定向漂移**。
- 微观与宏观的联系**：虽然单个电子的平均漂移速度极其缓慢（通常仅为毫米/秒量级），但金属中的自由电子密度却是天文数字（约  $10^{28}$  个/立方米）。正是这**无数微观电荷有序的集体行为**，构成了我们在宏观上测量到的、能够产生显著效应的电流  $I$ 。

因此，我们可以得出本节的核心结论：**运动的电荷产生磁场**。宏观电流所产生的磁场，正是其内部海量运动电荷所产生磁场的矢量叠加。这个看似简单的结论，是我们理解一切磁现象的起点。

## 定量描述

在确立了“运动电荷生磁”的定性认识后，物理学家们迅速给出了精确的数学描述。

- **毕奥-萨伐尔定律 (Biot-Savart Law)**：这是一个更基本的定律，它描述了一个无穷小的电流元  $I d\mathbf{l}$  在空间某点  $\mathbf{r}$  处产生的微小磁场  $d\mathbf{B}$ 。

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

其中， $\mu_0$  是真空磁导率（一个基本物理常数，其值为  $4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ ）， $\hat{\mathbf{r}}$  是从电流元指向该点的单位矢量。这个公式的矢量叉乘  $\times$  结构，天生就决定了磁场是环绕着电流的。

- **安培环路定律 (Ampere's Circuital Law)**：当电流分布具有高度对称性时（例如无限长直导线或螺线管），安培定律提供了一个更简便的计算方法。它指出，磁场  $\mathbf{B}$  沿任意闭合路径  $C$  的线积分，等于穿过该路径所围成面积的净电流  $I_{\text{enc}}$  乘以  $\mu_0$ 。

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{\text{enc}}$$

## 方向判断

为了直观地判断磁场的方向，我们使用著名的**安培定则（右手螺旋定则）**：

用右手握住导线，让大拇指指向电流的（正电荷流动）方向。此时，你弯曲的四指所环绕的方向，就是磁感线的方向。

### 1.1.2 变化的电场：麦克斯韦的先知之声

如果说电流生磁是实验的发现，那么变化的电场生磁，则是理论物理学的伟大胜利。詹姆斯·克拉克·麦克斯韦在整理和统一当时的电磁学知识时，发现安培环路定律在数学上存在一个逻辑缺陷（当应用于给电容器充电这类非稳恒电流情况时）。

为了弥补这个缺陷，他大胆地提出了一个全新的假设：**一个随时间变化的电场  $\partial \mathbf{E} / \partial t$ ，其效果等同于一种电流，同样可以在周围空间中激发出磁场**。他将这一项称为“位移电流密度”  $\mathbf{J}_D = \epsilon_0 (\partial \mathbf{E} / \partial t)$ ，其中  $\epsilon_0$  是真空介电常数。

修正后的安培定律，现在被称为**安培-麦克斯韦定律**，其微分形式为：

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

这个新增的项  $\mu_0 \varepsilon_0 (\partial \mathbf{E} / \partial t)$  意义极其深远：

- **对称之美**：法拉第电磁感应定律告诉我们“变化的磁场能产生电场 ( $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$ )”，而麦克斯韦的补充则完美地构成了“变化的电场也能产生磁场”的对称画面。这是一种深刻的自然和谐。
- **电磁波的诞生**：正是这种“你生我，我生你”的交替循环机制，使得电磁场可以脱离电荷和电流的束缚，以波的形式在空间中自我传播。麦克斯韦通过计算，预言了这个波的速度  $c = 1 / \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ ，其数值与当时测量的光速惊人地吻合，从而做出了石破天惊的论断：**光，就是一种电磁波**。

### 1.1.3 内禀磁矩：微观粒子的“量子自旋”

除了电荷的宏观运动（电流）和场的动态变化，磁场的第三个来源深植于量子世界。许多基本粒子，如电子、质子、中子，都具有一种称为**自旋角动量**的内禀属性。这是一种纯粹的量子力学效应，**不能**简单地类比为宏观物体的自转，但它确实表现为一个固有的、量子化的角动量。

更重要的是，带电粒子的自旋角动量总是伴随着一个**内禀磁矩  $\mu$** 。可以将其想象为，每个电子都像一个永不消逝的、极微小的指南针，其N、S极方向与自旋方向绑定。

- **来源**：这种磁性是粒子**与生俱来**的属性，如同它的质量和电荷一样，是其基本身份的一部分，是量子场论中粒子场的基本性质。
- **宏观体现**：我们日常生活中遇到的**永久磁铁**（如铁、钴、镍等铁磁性材料），其强大的磁性并非源于内部的宏观电流。它的根本原因在于，材料中原子的外层电子（主要是未配对电子）的自旋磁矩，在外磁场的作用下发生了大规模的、指向一致的**有序排列**。当外磁场撤去后，由于材料内部的量子力学交换作用，这种有序排列能够被“锁定”下来，从而在宏观上表现出稳定的磁性。

#### 本节小结

磁场的来源被统一在“电荷”这一核心概念之下，它通过三种方式展现自身：

1. **电荷的集体定向运动（宏观电流）。**
2. **电荷产生的场随时间的变化（变化的电场）。**
3. **带电粒子自身内禀的量子属性（自旋）。**

## 1.2 洛伦兹力之谜：一个思想实验的“法庭质证”

我们已经知道磁场如何产生，现在的问题是，它如何作用于其他物体？洛伦兹力公式给出了答案，但其形式也带来了深刻的困惑，必须对其进行极其严格的解读。

### 1.2.1 洛伦兹力定律：一个严格的本地化定义

描述一个电荷  $q$  在电磁场中受力的定律，是物理学的基石之一——洛伦兹力定律。

#### 洛伦兹力定律

在一个**确定的、单一的惯性参考系**中，一个电荷为  $q$ 、速度为  $\mathbf{v}$  的粒子，在其**所在的时空点**上，如果测得的电场为  $\mathbf{E}$ 、磁场为  $\mathbf{B}$ ，则该粒子受到的力  $\mathbf{F}$  为：

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

这个定义的**本地化 (local)** 和**相对参考系 (frame-dependent)** 的特性，是解开所有谜题的关键。

### 1.2.2 思想实验：“扫过的磁场”为何无效？

#### “案情”陈述：

- 一个源电荷  $Q$  以速度  $\mathbf{v}_Q$  运动，在其周围产生了电场  $\mathbf{E}_Q$  和磁场  $\mathbf{B}_Q$ 。
- 一个测试电荷  $q$  静止在空间某点， $\mathbf{v}_q = 0$ 。
- 随着  $Q$  的运动，它产生的磁场  $\mathbf{B}_Q$  毫无疑问地在“扫过”或“穿过” $q$  所在的位置。
- **问题：**  $q$  是否会因为这个“扫过”的磁场而感受到磁场力？

#### “法庭”审理：

我们现在扮演法官，严格依据《洛伦兹力法典》进行判决。

1. **传唤证人（进行测量）：** 在实验室这个参考系中，我们测量得到：测试电荷  $q$  的速度  $\mathbf{v}_q = 0$ ；在  $q$  所在的位置，磁场  $\mathbf{B}_Q \neq 0$ 。
2. **应用法条（代入公式）：** 我们计算磁场力分量  $\mathbf{F}_B = q(\mathbf{v}_q \times \mathbf{B}_Q)$ 。
3. **得出结论：** 将测量值代入，得到  $\mathbf{F}_B = q(0 \times \mathbf{B}_Q)$ 。根据矢量代数的公理，任何矢量与零矢量的叉乘结果必然是零矢量。因此， $\mathbf{F}_B = 0$ 。

**判决：** 尽管存在一个非零且动态变化的磁场，但由于被作用的粒子本身在该参考系下速度为零，故其受到的磁场力**严格为零**。

### 1.2.3 物理实在与相互作用规则的根本区别

这个判决结果似乎违背直觉。我们的直觉混淆了两个根本不同的概念。

#### 【观念辨析：场的存在 vs. 力的产生】

- **场的存在 (物理实在)**: 由源电荷  $Q$  产生的  $B$  场是客观存在的，它的确在时间和空间中演化。它是一张覆盖时空的“地图”。
- **力的产生 (相互作用规则)**: “力”不是场单方面的属性，而是**场与粒子共同作用**的结果。洛伦兹力定律就是这本地图的“使用说明书”。

这本“说明书”明确规定，磁场这一项要“生效”，必须满足一个前置条件：**被作用的粒子本身必须相对于本地图运动** ( $v \neq 0$ )。这个规则并非随意的规定，它深植于物理定律的自治性与相对论的协变性之中，这正是物理世界保持和谐统一的关键。

将“力”理解为在相互作用的瞬间，由“**场的状态**”和“**粒子的状态 (包括其速度)**”共同 **动态生成**的结果，是理解此问题的关键。

## 1.3 “磁场是电场的相对论效应”：一个定性到定量的证明

现在，我们准备揭示本章最核心的思想：电与磁并非并列的两种力，而是同一个电磁实在在不同观测视角下的不同“投影”。

### 1.3.1 思想实验：通电导线旁的运动电荷

让我们构建一个更精巧的思想实验，它将被我们反复使用：

- **场景**：一根无限长的直导线，其中包含两种电荷：
  - 静止的、带正电的金属阳离子，单位长度的电荷密度为  $+\lambda_0$ 。
  - 以漂移速度  $\mathbf{v}_d$  运动的、带负电的自由电子，单位长度的电荷密度为  $-\lambda_0$ 。
- **整体电中性**：在**实验室参考系 S** 中，正负电荷密度恰好抵消，所以导线整体呈电中性。导线中存在一个大小为  $I = \lambda_0 v_d$  的稳恒电流。
- **测试粒子**：一个带正电的粒子  $q$ ，正以速度  $\mathbf{v}$ （与电子运动方向相同）在距离导线  $r$  的地方平行于导线运动。

### 1.3.2 定性分析：长度收缩如何“创造”出电荷密度差

现在，我们分别从两个不同的惯性参考系来分析  $q$  的受力情况。

## 分析一：在实验室参考系 S 中

1. **电场力**：由于导线是电中性的，它不产生净的电场。因此，电场力  $\mathbf{F}_E = 0$ 。
2. **磁场力**：导线中的电流  $I$  产生一个环绕它的磁场  $\mathbf{B}$ 。在  $q$  所在的位置，根据安培定律，磁场大小为  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ 。根据右手定则，如果电流向右，则  $q$  上方的磁场方向是“射出纸面”的。
3. **洛伦兹力**： $q$  以速度  $\mathbf{v}$  在磁场  $\mathbf{B}$  中运动，受到的洛伦兹力  $\mathbf{F}_B = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ 。根据矢量叉乘规则（右手定则），这个力的方向指向导线（吸引力）。

**S系的结论：** 粒子  $q$  受到了一个**纯粹的磁场力**，被吸引向导线。

## 分析二：在测试粒子参考系 S' 中（与 $q$ 同步运动）

现在，我们跳到  $q$  的“肩膀”上，以它的视角来看世界。

1. **粒子状态**：在 S' 系中， $q$  是静止的 ( $\mathbf{v}' = 0$ )。根据洛伦兹力定律，它受到的磁场力**必然为零**。
2. **力的来源**：然而，我们在S系中已经确定  $q$  会受力，这个物理事实是绝对的。既然磁力为零，那么在S'系中，这个力**只能是电场力**！ $\mathbf{F}' = q\mathbf{E}'$ 。
3. **电场  $\mathbf{E}'$  从何而来？**——爱因斯坦的狭义相对论登场了。

### 狭义相对论之长度收缩

运动的物体在运动方向上的长度，在静止的观测者看来会变短， $L = L_0/\gamma$ ，其中  $L_0$  是物体静止时的长度（固有长度），而  $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$  是洛伦兹因子。

我们用这个效应来分析S'系中的导线：

- **正离子的视角**：在 S' 系中，原本在S系静止的正离子正在以速度  $-\mathbf{v}$  反向运动。它们的间距会收缩，单位长度内的正电荷密度会**增加**， $\lambda'_+ = \gamma_v \lambda_0 > \lambda_0$ 。
- **电子的视角**：电子原本的速度是  $\mathbf{v}_d$ 。在S'系看来，它们的速度需要通过相对论速度加法公式计算，得到  $\mathbf{v}'_d$ 。由于  $q$  与电子同向运动，这个相对速度会比  $v$  和  $v_d$  都小。这意味着，电子相对于S'系的洛伦兹因子  $\gamma'_d$  会比正离子相对于S'系的洛伦兹因子  $\gamma_v$  要小。因此，电子间距的收缩效应**减弱**了，单位长度内的负电荷密度大小的增加幅度也较小， $|\lambda'_-| = \gamma'_d \lambda_0$ 。

## 惊人的结果：

在 S' 系中，正电荷密度  $\lambda'_+$  **不再等于** 负电荷密度  $|\lambda'_-|$ ！由于  $\gamma_v > \gamma'_d$ ，导线整体带上了**净的正电荷**！

这根带净正电的导线，自然会在其周围产生一个径向向外的**电场  $\mathbf{E}'$** 。但是，请注意，我们的例

子中，S系观察到的是吸引力，这意味着在S'系中也必须是吸引力。这意味着S'系中的导线应该带**净负电**。这取决于 $v$ 和 $v_d$ 的相对大小，如果 $v > v_d$ ，则S'系中的电子相对于正离子运动得更快，负电荷密度收缩更厉害，导线带净负电，产生吸引力。这里的核心思想不变：**相对运动导致了净电荷密度的出现**。

### 1.3.3 从“力”的等效性看电与磁的初次统一

通过这个思想实验，我们得到了一个革命性的结论：

**同一个物理现象（粒子q受力偏向导线），在不同的惯性参考系中，被归结为完全不同的“力”的来源。**

- **S系观测者**：“我用磁场和洛伦兹力定律解释了一切。”
- **S'系观测者**：“胡说，我明明只看到了电场和库仑定律的作用。”

谁是对的？**都对**。

他们只是从各自的视角，用各自的测量工具（ $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$  或  $\mathbf{E}'$ ,  $\mathbf{B}'$ ）描述了同一个客观实在。这雄辩地证明了：

- **电场和磁场不是孤立的实体**，而是同一个更根本的“电磁场”的两个不同侧面。
- **磁场可以被看作是电场在相对论效应下的必然产物**。一个观测者看到的纯电场，在另一个相对他运动的观测者看来，必然会伴随着磁场的出现。反之亦然。

## 第一章总结

在本章，我们重走了电磁学最初的探索之路，但每一步都带上了相对论的“眼镜”。我们从电荷的运动（电流）、场的动态变化（麦克斯韦增项）和内禀属性（自旋）三个方面，将所有磁现象的起源统一到了“电荷”这一根本概念上。随后，通过一个对洛伦兹力定律的严格“法庭质证”，我们澄清了“场的存在”与“力的产生”之间的关键区别。最终，在“通电导线旁的运动电荷”这一核心思想实验中，我们见证了狭义相对论的长度收缩效应如何将一个参考系中的“纯磁场力”，在另一个参考系中“变身”为“纯电场力”。

这不仅揭示了磁场的本质，更重要的是，它将电、磁、以及时空运动这三个看似无关的概念，第一次深刻地联系在了一起，为我们接下来深入探索电磁场的统一理论，打下了坚实的概念基础。

---

### 【本章思考题】

考虑两根平行的通电导线。如果电流同向，它们相互吸引；如果电流反向，它们相互排斥。

1. 请尝试运用本章1.3节的思想，从其中一根导线上的电子的视角（S'系）出发，只用电场力的概念，来解释这两种情况下的吸引和排斥现象。
2. (进阶) 在经典力学中，牛顿第三定律（作用力与反作用力）要求两个物体间的相互作用力大小相等、方向相反、作用在同一直线上。在磁相互作用中，这个定律是否总是成立？（提示：考虑一个运动电荷与一根载流导线的作用力）