

现代电磁理论深度解析：从经典直觉到终极统一

前言：一份写给探索者的地图

- 本书的目标与读者定位
- 学习建议：如何最大化利用这份文档
- 符号与约定

第一章：风起于青萍之末——磁的起源与相对论的初啼

- 1.1 一切磁现象的根源
 - 1.1.1 宏观电流与安培定则：运动电荷的集体行为
 - 1.1.2 变化的电场：麦克斯韦的先知之声
 - 1.1.3 内禀磁矩：微观粒子的“量子自旋”
- 1.2 洛伦兹力之谜：一个思想实验的“法庭质证”
 - 1.2.1 洛伦兹力定律：一个严格的本地化定义
 - 1.2.2 思想实验：“扫过的磁场”为何无效？
 - 1.2.3 物理实在与相互作用规则的根本区别
- 1.3 “磁场是电场的相对论效应”：一个定性到定量的证明
 - 1.3.1 思想实验：通电导线旁的运动电荷
 - 1.3.2 定性分析：长度收缩如何“创造”出电荷密度差
 - 1.3.3 从“力”的等效性看电与磁的初次统一

第二章：场与粒子——量子场论的革命性世界观

- 2.1 场的本质：宇宙的终极“材料”
 - 2.1.1 从经典场的“属性地图”到量子场的“宇宙床垫”
 - 2.1.2 真空不空：场的基态与零点能
- 2.2 粒子的诞生：场的量子化激发
 - 2.2.1 涟漪与能量包：光子、电子是什么？
 - 2.2.2 $E = mc^2$ 的深层含义：从真空中“创造”物质——对产生

- **2.3 “荷”：基本力的“入场券”**
 - 2.3.1 电荷、色荷、弱荷：宇宙的“主题公园”比喻
 - 2.3.2 耦合常数：门票的面值与相互作用强度
 - 2.3.3 中微子为何“与世无争”？

第三章：对称性的胜利——电磁场的必然诞生

- **3.1 U(1)规范对称性：宇宙的底层语法**
 - 3.1.1 全局相位变换：一个无伤大雅的整体旋转
 - 3.1.2 局部相位变换：一个颠覆性的哲学要求
- **3.2 理论的“崩坏”与“修复”：协变导数的引入**
 - 3.2.1 详细推导：为何局部变换会“污染”物理定律？
 - 3.2.2 “救世主”的降临：协变导数 D_μ 的构造
 - 3.2.3 规范场 A_μ ：为维护对称性而生的“补偿场”
- **3.3 电荷的终极定义与相互作用的微观图像**
 - 3.3.1 电荷 q ：粒子场与规范场耦合强度的度量
 - 3.3.2 费曼图入门：可视化基本作用的“顶点”

第四章：电磁场的统一几何——张量语言的优雅

- **4.1 从经典势到四维矢量： A^μ 的确立**
 - 4.1.1 线索一（Bottom-Up）：从麦克斯韦方程追溯 V 和 \mathbf{A}
 - 4.1.2 线索二（Top-Down）：相对论协变性对四维矢量的要求
 - 4.1.3 终极“指认”：洛伦兹变换下的完美契合
- **4.2 电磁场张量 $F^{\mu\nu}$ ：规范不变的物理实在**
 - 4.2.1 定义与构造： $F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$
 - 4.2.2 详细证明：为何 $F^{\mu\nu}$ 是规范不变的？
 - 4.2.3 矩阵展开：电场为“时空”分量，磁场为“空空”分量的几何内涵
- **4.3 洛伦兹变换下的电磁场**
 - 4.3.1 张量的洛伦兹变换法则
 - 4.3.2 详细推导： \mathbf{E} 与 \mathbf{B} 的混合变换公式
 - 4.3.3 “两次补偿”机制的深度剖析：场变换与力公式的协同作用

第五章：宇宙的交响乐——麦克斯韦方程组的张量协奏

- **5.1 有源方程：** $\partial_\mu F^{\mu\nu} = \mu_0 J^\nu$
 - 5.1.1 逐分量推导：如何从 $\nu = 0$ 得到高斯电场定律
 - 5.1.2 逐分量推导：如何从 $\nu = 1, 2, 3$ 得到安培-麦克斯韦定律
- **5.2 无源方程：比安基恒等式的物理回响**
 - 5.2.1 方程的数学起源： $F_{\mu\nu}$ 定义的必然推论
 - 5.2.2 逐分量推导：如何从纯空间分量得到高斯磁定律
 - 5.2.3 逐分量推导：如何从时空混合分量得到法拉第电磁感应定律
- **5.3 四维洛伦兹力：** $f^\mu = qF^{\mu\nu}u_\nu$
 - 5.3.1 从四维力到三维力的推导
 - 5.3.2 $F^{\mu\nu}$ 不变与力 f^μ 可变的终极辨析

第六章：理论的顶点与地平线——通往终极统一

- **6.1 拉格朗日量与最小作用量原理**
 - 6.1.1 电磁理论的单一“种子”： $\mathcal{L} = -\frac{1}{4\mu_0} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - J^\mu A_\mu$
 - 6.1.2 从 \mathcal{L} 推导有源麦克斯韦方程的数学之旅
 - 6.1.3 为何说拉格朗日量是更本质的统一？
- **6.2 物理学的圣杯：万有理论的展望**
 - 6.2.1 大统一理论（GUT）：力的“趋同”
 - 6.2.2 弦理论/M理论：万物皆为弦音
 - 6.2.3 圈量子引力：时空的“像素化”

后记：一份探索的邀请