



武汉大学物理学院

粒子物理（研究生）

粒子物理报告学习笔记

Professor:

张振宇

物理学院

Author:

何显龙

2020102020001

2021 年 6 月 6 日

目录

| | |
|--------------|----|
| 1 概述 | 2 |
| 2 历史 | 3 |
| 3 基本力及费曼图 | 5 |
| 4 动力学与守恒律 | 6 |
| 5 对称性 | 7 |
| 6 束缚态 | 8 |
| 7 狄拉克方程及衰变散射 | 10 |

1 概述

自古以来，人们就有尝试从基本物质的角度去理解事物演化规律，典型的中国五行“金木水火土”，古希腊神话也相传自然界有四大元素：风火水土、它们各自有一块代表的神石。《庄子·天下》所言“一尺之捶，日取其半，万世不竭”，或许是第一次对事物无限可分的概括。

直到近代物理学的发展，才逐步证实通常的物质是由原子分子组成。现代粒子物理学的建立，对原子分子进行更深入的研究，以当前最高精度、在最小线尺度上回答了“物质基本组成”的问题。基础与常见的分子，组分是原子核与电子，原子核组分是质子与中子，质子与中子继续的细分结构是夸克。在研究基本组分的时候，在高能部分顺带还发现了与电子同类型的 μ 子、 τ 子，及其对应的三代中微子。核子、夸克类型也发现了，不同于组成质子、中子的其他重夸克，研究这些重夸克的主要方式是 3 个重夸克组成的类似质子中子的粒子、或另一种由一对正反夸克（2 个）组成的介子。除此之外，物理学家在粒子反应中还发现类似光子——传递电磁相互作用的媒介子，W、Z 介子——传递弱相互作用，胶子——传递强相互作用。最近，LHC 对最后一个、赋予上述所有其他基本粒子质量的 Higgs 粒子的发现，标志着（粒子物理）标准模型对全部基本粒子预言成功。

自牛顿以来，物理学研究的重点主要在于运动学、动力学，即在给定初始条件下的运动轨迹、物质间相互作用的本质。但基本粒子不像实物，尤其是斜面上的小木块，无法拿在手上通过人体尺度去“观察”、“测量”其运动学方式，进而推断物体动力学相互作用形式。通常我们只有三种实验手段：束缚态、衰变、散射，借助这种两体甚至多体反应，研究其总体对外效应、出射结果的运动学方式，反推基本粒子相互作用。但由于基本粒子过于微小、反应样本远不如经典系统充足、环环相套了过多假设近似，因而常常只能猜测具体的相互作用数学形式，再通过实验验证、拟合参数。

按照能量守恒原理，轻质量粒子原则上都可以由重粒子产生。而对重粒子，按照爱因斯坦质能方程，只能通过高能量产生，因此通常大家都会认为粒子物理主要实验基地在“高能物理所”，实验上通常只能由宇宙射线、核反应、粒子加速器产生。最后一步是如何检测，即如何在实验上“测量”基本粒子运动学轨迹，多数检测机制都基于云室、气泡室、火花室，高能粒子穿过时会沿路电离并留下径迹，再通过加磁场、借助粒子在洛伦兹力下的回旋方式、以区分不同荷质比的粒子。

尽管真正从理论上充分完整理解需要较深刻的量子场论知识，但作为通识与基础课，以及量子场论的前沿知识，在粒子物理导论课的学习过程中，第一步当然应该是首先熟悉各种轻子、夸克、媒介子等基本粒子，及其组成的重子、介子的基本性质与反应方程式。第二步应该是粗略了解基本粒子的强、电磁、弱三种相互作用方式，以费曼图为标志，能在指导性的费曼规则下计算衰变率、散射截面，基本就可说看懂了粒子物理导论。但哪怕是略过了推导费曼规则的量子场论知识，后一步的积分计算仍然相当繁琐冗杂。

2 历史

回顾基本粒子的发现历史，对理解学科框架是十分必要的。Griffiths (坚持) 认为基本粒子物理随着 Joseph John Thomson 发现电子诞生于 1897 年，(尽管) 如此精确指明这个时间节点显得有些武断。Thomson 当时了解到热丝辐射的阴极射线会在磁场的作用下偏转，甚至还能通过附加精确调节的电场使之回正，根据洛伦兹力公式 Thomson 猜测这种微粒是原子的组成部分，后被命名为电子。这一利用磁场、电场研究带电粒子径迹、进而推断其运动学的方式，至今仍在广泛使用。此后 1911 年 Ernest Rutherford 的 α 粒子散射实验对原子核-电子结构的发现，被认为是原子核物理的开端。这种利用靶散射实验研究粒子相互作用，作为上述运动学前端的动力学方式，与衰变、束缚态一同，组成当今相互作用三大实验手段。1932 年 James Chadwick 发现中子的实验，标志着通常理解“基本粒子物理经典时期”的最后阶段完结。

反粒子由狄拉克方程预言，是薛定谔方程向狭义相对论的推广的产物。反粒子确实是真实存在的粒子，只不过其时间演化方式与正粒子相反，数学上体现在满足的含时演化薛定谔方程与正粒子相差一个负号，本质是狄拉克方程完备集的要求。其核心标志性反应是正反粒子对湮灭成光子。

中微子的引入主要来自于， β 衰变作为一个确定性结果的两体衰变，其出射粒子竟然不是定值、而是满足三体衰变结果的谱，这种不参与电磁相互作用、因而无法被我们“看到”的粒子被称作中微子，后来发现其也不参与强作用，只出现在弱作用中，直接导致轻子数守恒定律的提出，因而被归为类似电子的轻子家族。

光子，从某种角度说是相当现代的粒子，虽然围绕光的波动性、粒子性的讨论自牛顿时代就有。“波粒二象性”某种角度是基于实验事实被物理学家“强迫”接

受的，但在现代量子场论中自然地给出电磁相互作用的新观念。经典认为电荷激发的电磁场，导致电磁相互作用；场论中认为电磁场以光子的形式量子化，相互作用图像是电荷间相互穿梭的光子。需要注意的是，我们说通过交换（光）粒子（媒介子）实现相互作用，并不是指“运动学”的“交换”。媒介子仅仅作为“信使”，连接两个基本过程（基础顶角）“积木”的费曼图（当然也可以用轻子线连接）。

由于电磁相互作用力程近似无限远，可以估算其媒介光子的静质量应该为 0。那么对于原子核，把质子与中子束缚在一起的力（的量子化粒子）是什么呢？汤川秀树使用 Heisenberg 不确定性原理 $\Delta E \Delta t \leq \hbar/2$ 对此进行了估计，其中时间估计为光速（类比光子）穿过力程（即原子核半径），估计质量与能量对应。结果大约为 300 倍电子质量、或 $1/6$ 质子质量，介于当时已知的质子、电子之间，因而被命名为介子（meson），后来在宇宙射线中被成功发现。随着探测技术的进步，基于“重子数守恒”等分类准则，实验中发现了更多所谓“重重子”“重介子”等被称作“奇异”的粒子，更技术的含义是，奇异粒子是通过强作用力产生的（约 10^{-23}s ），弱作用力衰变（典型 10^{-10}s ），并衍生出了“奇异数”这一分类准则。1947 年看起来十分整洁的花园（e、p、n）到 1960 年长成为丛林（过多的强相互作用粒子），这混沌的世界仅被粗略分为重子、介子两大家族，期待着粒子物理中“元素周期表”的出现。

Murray Gell-Mann 于 1953 年给出电荷数与其他守恒量子数之间的关系，做出初步的分类后，与 1961 年引入重子八重态、介子八重态、重子十重态，这提供的与元素周期表类似的组织结构与分类，标志着粒子物理现代时期的开始。1964 年还是 M. Gell-Mann，与 George Zweig 各自独立提出对上述多重态的理解，即当前的夸克模型及组成规则，即有三种（轻）夸克 uds，（可重复）选三个组合成重子、正反夸克对组成介子、三个反夸克组成反重子。为避免违背 Pauli 不相容原理，1964 年 O. W. Greenberg 提出夸克除了有 uds 三种味、还应该有 rgb 三种色荷，并且由于色禁闭只存在正反色介子、rgb 三色齐全的重子，从这个角度说是借鉴了光的三原色，效果上类似标记电荷的正负号（只不过这里有三个，仅正负号不够用）。夸克模型与群论相结合的巨大成功与自恰，给粒子学家以莫大的鼓舞。

回忆汤川秀树引入介子的初衷，是为了描述“束缚”质子和中子组成原子核的强相互作用力；而电磁相互作用由光子传递，这被很早发展出的量子场论所预言并证实。对弱相互作用，人们也很自然会尝试计算预言其媒介子。然而直到 70 年代 Glashow, Weinberg, Salam 的电弱统一理论问世，才确切的对弱作用媒介子做出预

言。注意区分两夸克构成的介子 meson 与三种传递相互作用媒介子 mediator，后者也被称作中间矢量波色子 intermediate vector boson。需要注意的是，在最后用现代共识的标准模型描述，介子 meson 并不是媒介子 mediator 之一，夸克之间的强作用媒介子被称作胶子 gluon，重子间相互作用是多个夸克共同作用，以类似范德瓦尔斯力的形式，协同作用的等效结果是传递了一个介子。

还有一个相当重要的所谓“十一月革命”时期，即丁肇中组于 1974 年夏天在布鲁克海文发现 ψ 介子，检查其结果直到 11 月 10-11 日才公布，展示出与已知所有粒子相当不同的差异性。后来由夸克模型正确解释，提出除 uds 之外的新的、更重的 c 夸克。在这之后“重”轻子 τ 及其对应中微子、另两个重夸克的发现，以及最后 2012 年 LHC 成功发现 Higgs 粒子，终于填充完整了标准模型的 12 个轻子 = 3 代 * (某代轻子 + 对应中微子) * 正反 2 类、36 个夸克 = 3 代 6 个味 * rgb 三色 * 正反 2 类、12 媒介子 = 1 光子 + 3 弱 + 8 胶子、1 个 Higgs 粒子。现在也还有超出标准模型 (GWS 电弱统一) 的推断，也有统一强、弱、电磁的 GUTs 理论等，但目前尚未形成系统性学科和共识，仍有待观察与实验检验。

3 基本力及费曼图

就目前所知，自然界存在四种相互作用：强、电磁、弱、引力。由于引力过于微弱，粒子物理中常常忽略，充其量也只涉及到高速运动的狭义相对论，几乎所有情况都保持平直的 Minkowski 时空。作为导论与学习，将略去有难度的场论知识，以及复杂繁琐的计算。

为了直观描写粒子物理底层反应图像，需要使用费曼图。从最古老最简单最完备的量子电动力学 QED 讲起，所有电磁相互作用都能归结一个简单的基础过程，或初始顶角：一个电子入射，辐射光子后出射（损失能量动量）。原则上在后续对反应截面的计算中，还需要标注清楚其动力学行为，即能量、质量、或动量，显然这些是反应前后的某些守恒量。明显的，守恒定律决定，单个初始顶角并不能描述真实反应，最低阶图通常是 2 个顶角，原则上若仅限制入射和出射粒子状态，费曼图中间可以有任意多个顶角，代表可能的更冗杂的反应，所幸高阶圈图（顶角相互连接以至于内线闭合）对我们关注的截面影响逐阶迅速递减，因而常用的简便情况都会略去。光子是 QED 费曼图的标志。

QCD 的初级顶角非常类似，只不过媒介子由光子改为胶子。突出差别体现在

光子不带电荷，因而 QED 不会改变光子两端粒子（不局限于轻子）的电荷——即代、味、色；而夸克中色荷起电荷的作用，虽然不变味但可以变色，因而胶子必须携带色荷，这导致独立的三、四胶子顶角。即便如此，由于色守恒与色禁闭，通常反应中色态都是显然的，不影响实质结果。只在涉及交换对称和全同性时作为补充和辅助理论。另一重要特点是夸克禁闭，因而重子间相互作用必须通过较为复杂的、类似范德瓦尔斯力的形式，通过产生可能的（虚）介子来实现。

弱作用相对繁琐，有人称弱力的载体为“弱荷”，所有轻子、夸克都携带，其初始顶角有两类，中性、带电弱作用，分别由 Z、W 传递，媒介子类型仍是区分三种力的标志。中性弱过程与 QED 十分类似，甚至几乎所有光子媒介都可由 Z 媒介完成，但真实中由于电磁力更强，在衰变道中光子媒介占据压倒性优势。弱作用的标志除了 Z，还有参与反应的中微子，这正是对用 β 衰变定义弱过程的回归。带电弱作用对轻子，标志是轻子与对应代的中微子相互连接，代内对应的要求来自实验中的（各）轻子数守恒。对夸克，带电弱作用也十分类似，同代之间夸克通过辐射 W 相互转换，但实验中确有发现代际间的转化，需要引入新参数的转换矩阵，表示允许奇异数不守恒。

从上述费曼图的角度说，或许只有带电弱作用可以称作“衰变”，因为除此之外其他费曼图都不改变媒介子两端粒子的“味”，而通常的“衰变”不过只是束缚态中部分正反粒子的湮灭、或基本粒子的重新组合。基于基本力的强弱关系，典型的强衰变涉及的寿命为 10^{-23}s 左右，典型的电磁衰变为 10^{-16}s ，而弱衰变仅有 10^{-13}s (τ 子) 甚至 10^3s (中子)。费曼图中总的可用守恒数是：电荷、颜色（相当平庸）、重子数、轻子数、夸克的味，还有一个非常特殊的 OZI 规则。明显的，电、色作为两种动力学的“源”，似乎比重、轻子数守恒更基本，尽管囊括强作用的 GUTs 理论预言了后者不守恒的反应，但至今尚未有支持的证据。

4 动力学与守恒律

对于基本粒子反应，我们不可能使用放大镜观察内部原理，经典物理中测量弹簧长度在此不具有可操作性，只能基于入射出射粒子物理性质去反推其内部结构。对于低速粒子，原则上牛顿力学完全够用；但绝大多数情况是高能高速情况，必须使用狭义相对论动力学，去分析粒子的能量、动量。

狭义相对论的基础是光速不变原理，与坐标系变换的洛伦兹关系。基于坐标变

换的逆变（随基矢）、协变（随基矢展开分量）矢量、及二阶张量是主要数学代表，其坐标变换核心基于逆变、协变矢量缩并结果的标量是（坐标变换下的）不变量。为满足（广义）协变的要求，重新修改了经典物理的能动量守恒形式，给出狭义相对论中关键（反应前后的）守恒量：四动量，即能量、三动量守恒。结合四动量反应前后守恒量、缩并得坐标变换不变量，结果是守恒且不变到静质量。这三个量将是计算的核心方程。

求解真实的运动学问题某种角度是一种艺术，虽然都可简化为这些基础方程，但实际操作起来可能会遇到繁琐的代数，主要原因在于守恒量是线性和、不变量是平方和，有相当多的工具与技巧。其中一个质心系（centre of mass system）与实验室系（laboratory system）的转化，具体操作上就是，体系总四动量在反应前后守恒，且其缩并作为一个标量，在质心系、实验室系及任意参考系都相等。特殊的，对两体散射事例，还可以引入更方便的 Mandelstam 标量，优点在于其是洛伦兹（坐标变换下）不变。且反应出射是 2 个粒子的，原则上是定态解：能动守恒方程 $1+3 + \text{质壳方程 } n = \text{能量 } n + \text{动量 } 3n$ 、再去除一个方位角对称性。

5 对称性

在完全理解某些函数之前，对其对称性的研究往往能提供不小的帮助。1917 年，Emmy Noether 首次关联对称性与守恒量，证明前文提到的能量、动量守恒，分别对应时间、空间平移不变性，即四矢守恒对应四维时空平移不变。角动量守恒对应转动不变、电荷守恒对应规范不变（库伦、洛伦兹规范）。

对称性的精确描述，需要借助数学中群论的语言。粒子物理中转动对应 SO_3 群，自旋对应 SU_2 群，盖尔曼八重态对应 u, d 三种轻夸克（虽然质量不全等）组成的 SU_3 群（使得对称性并不完美），以及全部 6 味夸克组成的更不完美对称的 SU_6 群。质子中子抽象出来的同位旋 SU_2 对称性的完美，本质来自组成其的 u, d 两种夸克质量非常接近。群论的角度出发，会认为，粒子是庞加莱群的一个不可约表示。

作为与时空平移相当不一样的转动，其对应的角动量理论显得非常独特和内涵深远。利用量子力学提及的希尔伯特空间，借助一套完整的对易关系、算符、本征态理论，可以通过上升下降算符计算推理得到角动量可能的整数、半整数本征值。这还只是第一步对单个粒子的，下一步对多粒子耦合（叠加），对两体系统以

C-G 系数结束，三个及以上原则上可以多次一个个以 C-G 系数形式加入。盖尔曼十重态、八重态恰对应重子三夸克 uds 耦合成的两种自旋态： $s = 3/2$ 或 $1/2$ ，分别对应 SU3 群的八维、十维表示。

上述的连续对称性，由于可微分，才能推导出 Noether 定理，对应某个守恒量。不同于连续，自然界还存在分立对称性，不可微分因而不对应守恒量，但仍有某种不变性的对应。“宇称”算符，最早最初的定义指“反演”，即所有空间坐标都改变正负号，其于表示手性对称或镜像的“反射”仅相差了一个旋转、但都会改变手性。被宇称算符作用后是否变号，可以用于区分标量（宇称操作不变号）、“赝”标量（反号）；矢量（反号）、“赝”矢量，自旋为 0 的赝标介子是相当庞大的一个粒子家族。

李政道、杨振宁于 1956 年提出，弱作用过程中宇称不守恒，并被吴健雄实验证实。这促使人们寻找更基本的分立对称性，并发现引入电荷共轭的 C 变换，如果将宇称由 P 变换扩充为 C 变换，就可在一定程度上保留宇称不变性。中性 K 提供了一个完美的实验系统去检验 CP 不变性，并发现了微小 (10^{-3}) 的 CP 破缺；另一方面，中微子全都是左手、反中微子全右手，这暗示弱作用中、这是最大程度 (100%) 的 CP 破缺。最终的解决来自于量子场论基于最一般假设给出的普适性相当好的 TCP 定理，即引入时间反演变换 T 后，将宇称的含义进一步拓宽至时间、空间、电荷反演的共同变换 TCP 下（尽管仍会单独称 TCP 以示区别狭义的宇称 P），是严格不变的对称性，其直观的推论之一是正反粒子质量严格相等，并在当前实验精度下得到完美证实。

6 束缚态

作为粒子物理三种实验研究手段之一，束缚态相较散射、衰变，其研究起步更早、也更清晰，且后两者都可使用费曼规则计算散射振幅来统一描述，而束缚态的目标则是解薛定谔方程，期望从其解波函数、或更简单的分离能谱，去分析所有其他表观物理性质。

量子力学中薛定谔方程对氢原子能级的巨大成功，某种角度算是开启了现代原子物理学。随后氢原子的精细结构、兰姆位移、超精细结构被观察到，分别源自相对论修正、自旋轨道磁能；电磁场量子化的三个 QED 圈图；核自旋磁矩与其他自旋、轨道磁矩耦合的磁能，这导致微波天文著名的“21cm 线”。

作为氢原子理论基础上的修改，正电子偶素提供了一个对 QED 进行丰富检验的场地。除了约化质量的问题外，其所有微扰与精细结构都同阶，也还存在全新的费曼图。特别是，相比于更实际但更抽象的夸克偶素，即正反夸克组成的介子，正电子偶素可以提供对物理图像更清晰直观的认识。原则上，只有非相对论的重夸克介子才满足薛定谔方程，其中不同关键的势函数，由于测量精度限制，许多基于库仑势叠加泰勒展开的势函数模型都能很好的拟合实验数据。数值计算可以给出类似氢原子的能级结构，并且由于非相对论夸克介子太重、能级差也相当大，以至于常把夸克偶素不同能级看作是不同的质量的粒子。

轻夸克 (uds) 介子与轻夸克重子，其结合能与静能约在同一数量级，因而这种束缚态将具有明显的相对论效应。也许狄拉克方程是一种精确的理论算法，但考虑课程性质与容量，仅需从群论与对称性的角度，粗浅了解其基态波函数形式即可。轻夸克介子由一对正反夸克组成，夸克的自旋可以是反平行 (单态 $s=0$) 或平行 (三重态, $s=1$); 前者位形产生赝标九重态，后者给出矢量九重态。其质量差别极有可能来自自旋，并可启发至精细结构中自旋轨道磁能，设计参数化的质量分裂公式。

事实上常直接把轻夸克重子简称为重子，因为尚未创造出哪怕含一个重夸克的重子。重子比介子复杂性主要在两个方面，泡利不相容原理和三体系统的耦合。具体地说，介子组分是正反夸克，不是全同粒子、不会占据同个量子态、因而不涉及交换对称的问题。在原子物理中，占据同一轨道量子态的两个电子，由两种自旋量子态予以区分。若仅有两个同味夸克，自旋态尚且够用；三个同味夸克，就不得不引入颜色以示区分。用数学语言描述，就是总波函数等于空间、自旋、味道、颜色各独立空间波函数之积，对空间仅考虑最简单的全对称基态；对颜色自然界仅选择全反称的色单态，而重子作为费米子，这要求剩余的复杂三体耦合部分必须全对称。参照群论的理论，三个自旋 SU2 群直积的基础表示，可以分解为 $2 \times 2 \times 2 = 4 + 2 + 2$ 的直和形式，分别对应全对称、两个部分反称态；三个味 SU3 群直积的直和分解为 $3 \times 3 \times 3 = 10 + 8 + 8 + 1$ ，分别对应全对称、两个部分反称、全反称态。合并起来结果是，重子十重态对应全对称自旋、全对称味道之积；重子八重态对应部分反称自旋、部分反称味道之积的线性叠加。终于得到完整正确的重子波函数之后，作为应用，就可以计算其磁矩，以及由磁矩导致耦合磁能进而影响的重子质量结果。

7 狄拉克方程及衰变散射

在真实的衰变、散射实验中，出于高能的需求，常常入射、出射粒子速率都可比光速，因而束缚态中传统的薛定谔方程体系不再适用，相对论理论不得不被引入。狭义相对论对四动量的计算，解决了运动学的轨迹问题；下一步就是薛定谔方程的相对论推广——狄拉克方程，关注导致其运动学改变的原因，即动力学演化问题。在非相对论量子力学中，粒子由薛定谔方程描写；在相对论量子力学中，自旋 0、1/2、1 的粒子分别由克莱因 - 戈登方程、狄拉克方程、普罗卡方程描写。最常见的自旋 1/2 粒子满足的狄拉克方程，其最具颠覆性的推论是反粒子解，由于完备集而不可能被视为非物理解舍去。反粒子仍是正常“正能量”，只不过这种粒子的时间依赖是“反常”的，沿时间轴逆走。其根本原因在于薛定谔方程中，时间偏导前面系数 i 正负号的“约定”或“假设”的“原理”，对应着含时演化的正负方向性问题。而在狄拉克方程中， i 正负号的两种情况都被包含在内，对应着相差正负号的完备性关系。其最终结果是解出来的波函数，实际计算中通常只用完备性关系。

衰变的理解相对简单，单位时间衰变个数显然（预设猜测）正比于总数，即半衰期。

截面，其经典理解就是束流射箭的靶面积大小，粒子物理中的理解是以这个粒子为中心，束流能“击中”——即会被相互作用——的面积大小。卢瑟福散射实验可以计算出，电磁相互作用的截面几乎是无穷大。显然从电磁力的角度也容易理解，瞄准距离越近受力越大（相当于打靶得分越高），也就是对不同的截面微元，其散射指向的空间立体角大小有明显差别，于是不得不定义“微分散射截面”这一名词：建立起平面束流微元 d ，由于中心的势场，与“散射”后的球面（不仅是右半球面！）微元 $d\Omega$ 的一一对应关系。

衰变、截面的费曼算法一整套操作流程，书中略去了场论推导的计算、仅给出详细介绍操作流程，此处从略。