

粒子物理简介

曹庄宏教授讲授

陈彦博 chenyanbo@scu.pku.edu.cn

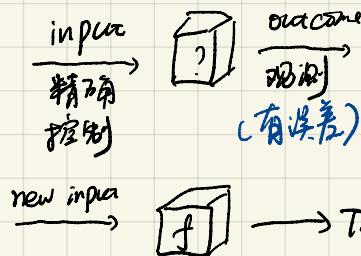
2020. 9. 23

大统一—标准模型：四种基本相互作用力

两类基本粒子：Boson - Fermion

100年前的两个现象 → 量子论 + 相对论

人类如何认识物理



数学模型: 不同的人构造不同模型
 $outcome = f(input)$ ± ?
 ↓ prediction: 新的 input
 元法验证

检验模型是否成功

Question: What and when to doubt?
How to test prediction?

实验才能真正推动物理学的发展。(需要革命性的实验装置、技术进展)

上世纪60年代—80年代 加速器 粒子物理飞速发展

① 强子内部结构 ② 电弱理论

obs — model — prev

教材: 无 参考书目: "Modern Particle Physics", Mark Thomson ★★

"Modern Elementary Particle Physics" Gordon Kane ★+士士发

"Concepts of Elementary Particle Physics" Peskin

"Introduction to Elementary P P" Griffiths

"--- to Hep" Perkins ★★

里程设置: 中介 35% ~ 40% 目的

(2) 期末 60% ~ 65%

Unification

the smaller the similar

now 散射振幅



三次对易子: P. E 的对易
二次量化、场之间的对易

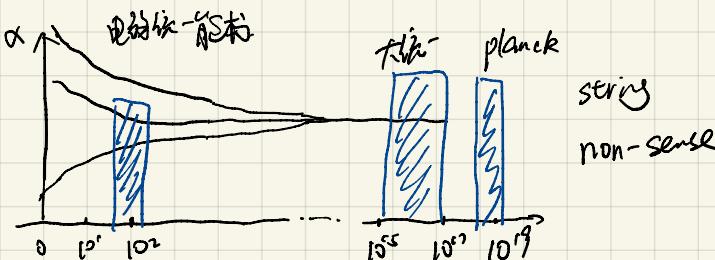
→ 弱相互作用 发展、重整化成功，可以解释兰姆分裂、反常磁矩问题 1930s → 扩广？ Chow

→ 强子物理，当时 QFT 无法解释非微扰。S-matrix 改用 QFT 和基本粒子解算.....

→ Gellman 流代数 流代数的条件是什么？可能存在 Quark → Quark model

→ QCD → Bjorken 标度不变性 → P-QCD → now

→ (μ ν_e ν_μ τ^- ν_τ ...) - 系列粒子 → GWS 电弱理论

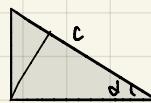


2020. 9. 25

物理常数与自然单位制

- 物理常数：大小、量纲

$$\textcircled{1} \text{ 勾股定理: } a^2 + b^2 = c^2$$



量纲为 $[L]^2$

伸缩不变
↑

$$S = f(\alpha, c^2) = \underline{\beta}(\alpha) c^2 = \beta(\alpha)(a^2 + b^2)$$

- ② 带电粒子 ($\alpha = \frac{q}{r}$) 加速运动，单位时间辐射能量

$$P = f\left(\frac{q}{r}, \vec{a}, c\right) \propto \frac{\alpha^2 q^2}{c^3} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{Larmor 公式}$$

$$G = mg = G_N \frac{m m}{r^2}$$

物理常数：描述一个系统 → 理论提升物理常数精细化
↓
全局 → 局域

- 粒子物理相关的物理常数 一般不考虑

"c" 光速 "普朗克常数" = k_B "玻尔兹曼常数" = G_N

$$\textcircled{1} \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Godel 不完备定理：一个公理化体系，不可能是既完备也逻辑自洽的

- ① Bertrand 定理：势能证轨迹闭合性 $-\frac{k}{r} - kr^2$?



- ② $c \rightarrow \infty$? 牛顿 Maxwell 方程 没办法回答

$$\textcircled{3} \quad h = 1.054 \dots \times 10^{-34} \text{ JS}$$

如果有特征时间 τ $h \cdot \tau \rightarrow$ 特征能量

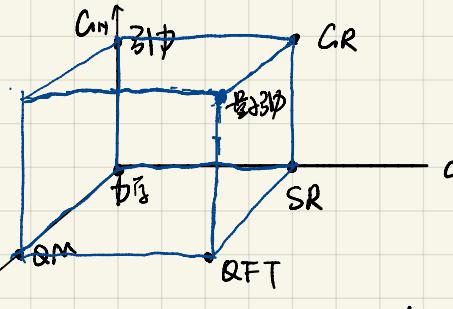
$$\textcircled{4} \quad \text{自然单位制} \quad c = h = 1$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad h = 6 \times 10^{-34} \text{ MeV/s}$$

$$\hbar c = 1 \Rightarrow 200 \text{ MeV fm} = 1$$

$$G_N = 6.708 \times 10^{-39} \frac{\hbar c}{(\text{GeV}/c^2)} \quad \Lambda_{pl} = 10^{19} \text{ GeV}$$

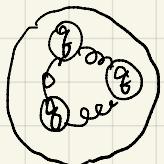
胡适分类



人类文明 $t \sim 3 \times 10^{-8} T_{宇宙年龄}$
 $t \sim 3 \times 10^{-5} T_{宇宙年龄}$

$$k_B = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1} = 1 \text{ 宇宙微波背景辐射 } T: 2.7 \text{ K} \sim 0.24 \times 10^3 \text{ eV}$$

$$\text{中微子 (v)} \quad \Delta m \sim \text{meV} \quad \text{室温 } 300 \text{ K} \sim \frac{1}{400} \text{ eV} \quad E_{\text{电子}} \sim \text{eV}$$

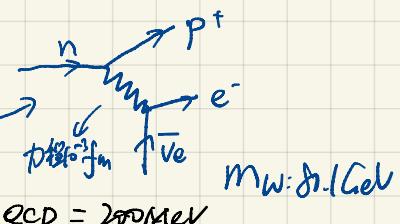


$$\text{强子结构: } V(r) = -\frac{4}{3} \frac{ds}{r} + kr$$

$$\text{电弱: } n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad \text{Fermi 四费米子相互作用} \quad \Lambda_{EW} \sim 100 \text{ GeV}$$

质子比荷未正小、三个量级 $n \rightarrow \frac{p}{e} \bar{\nu}_e$ 力程小.

$$G_F \sim \frac{1}{(100 \text{ GeV})^2}$$



2020.09.30

相对论性波动方程 ($c = \hbar = 1$)

$$E = \vec{p}^2 + m^2 \quad \psi \sim N e^{i(\vec{p} \cdot \vec{x} - Et)} = N e^{-ip \cdot x}$$

$(\partial_\mu \partial^\mu + m^2) \psi = 0$.薛定谔最早得到.不能得到量子能级.退化到 NR-QM

非相对论: 有连通性方程

$$P(x) = \psi^*(x) \psi \rightarrow = |N|^2 \vec{j} = \frac{1}{2im} (\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*) = |N|^2 \frac{\vec{p}}{m} = |N|^2 \vec{v}$$

$$\nabla \cdot \vec{j} + \frac{\partial P}{\partial t} = 0$$

相对论版本

$$\frac{\partial}{\partial t} (\psi^* \frac{\partial \psi}{\partial t} - \psi \frac{\partial \psi^*}{\partial t}) = \nabla (\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*)$$

$$P = i(\psi^* \frac{\partial}{\partial t} \psi - \psi \frac{\partial}{\partial t} \psi^*) \quad \vec{j} = -i(\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*)$$

对于平面波(自由粒子):

$$P = 2|N|^2 E, \quad \vec{j} = 2|N|^2 \vec{P} \quad E = \pm \sqrt{\vec{p}^2 + m^2}$$

为了保证 Hilbert 空间基矢的完备性, 负能量的解不能随便丢掉.

如何解决问题? 1928 年 Dirac $E \psi = (\vec{\alpha} \cdot \vec{p} + \beta m) \psi$

$$\begin{aligned} \text{要求和 K-G 方程相符: } \quad & \alpha_i^2 = 1, \quad \alpha_j \beta + \beta \alpha_j = 0, \quad \alpha_i \alpha_j + \alpha_j \alpha_i = 0 \\ \text{① } \alpha_i \text{ 的本征值应为 } \pm 1 & \quad \beta^2 = 1 \end{aligned}$$

$$\text{② } \text{Tr}(\alpha_i) = \text{Tr}(\alpha_i \beta \beta) = -\text{Tr}(\alpha_i) = 0 : \text{维数只能是 } 2, 4, 6, 8, \dots$$

③ 要求 α , B 是厄米矩阵 (Hamiltonian) $H^+ = H$

且 $\dim = 4$ 时满足要求

连续性方程 $\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\psi} \gamma^0 \psi) + \nabla \cdot (\bar{\psi} \gamma^\mu \psi) = 0 \quad \partial_\nu j^\mu = 0 \quad j^\mu = \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$

解决了正能为负的问题，但能量仍有负值解

electron 1898 proton 1919 neutron 1931

$E = \pm \sqrt{p^2 + m^2}$ 针对负能量 提出真空是狄拉克海。模型虽然不自信，但是对后来的观念产生了深远的影响。所有粒子都是基态场（真空）的激发

Feynman- Stueckelberg 对负能级的解释：逆时间传播的粒子

经典电磁理论： $e^- \rightarrow -e^- \Rightarrow g \rightarrow -g$. 电荷变号

同时 $\psi \sim e^{i(\vec{p} \cdot \vec{x} - Et)} = e^{i(\vec{p} \cdot \vec{x} - E't')} \quad E' = -E, \quad t' = -t$

K-A 电流流 正解： $J_{el}^m = (+g) 2|N|^2 (E, \vec{p})$

负能： $J_{en}^m = (-g) 2|N|^2 (-E, \vec{p}) = (-g) 2|N|^2 (E, -\vec{p})$

1931年 Anderson positron in cosmic ray $e^- \leftrightarrow e^+$ 反粒子 (anti-particle)

1928-1931 三个非常重要的观念 Dirac Equation · 真空 · 反粒子

仍存在的问题 ① 粒子产生和湮灭 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

$|0\rangle = |\text{anything}\rangle$

② 粒子 = $|0\rangle$ 真空激发态

③ 微观因果性 $[\hat{\theta}(x), \hat{\theta}(y)] = 0$ when $(x-y)^2 < 0$ 微观因果律是

波函数 \times 场 $\checkmark \longrightarrow$ 量子场论

QM + SR \longrightarrow QFT.