

# 物理学的终极目标还有多远

## ——强作用力与电磁力的统一

刘云\*, 刘喆, 刘子轶

黄淮学院物理系, 刘云工作室, 河南 驻马店

收稿日期: 2024年8月23日; 录用日期: 2024年9月16日; 发布日期: 2024年9月24日

### 摘要

本文中, 中国的刘云小组通过改进狄拉克相对论波动方程, 给出了一个可以精确计算粒子各量子态质量的公式, 进而对重夸克偶素质量谱进行了细致的研究, 计算出了夸克偶素各量子态内部强作用力的系数, 寻找到了强作用力随距离变化的规律。经过研究和对比, 最终证明在重夸克偶素 $J/\psi$ 粒子和 $\Upsilon$ 粒子中, 夸克之间的强作用力规律完全符合电荷力的相对论效应的总叠加, 从而证明强作用力与电磁力是统一的。刘云小组的研究结果还表明, 夸克并不是点粒子, 具有半径和自旋速率, 电荷数很可能也是整数, 夸克偶素的壳层结构也并不是从基层排布。

### 关键词

狭义相对论, 量子力学, 粒子物理, 大统一理论, 重夸克偶素

# How Far Is the Ultimate Goal of Physics

## —Unification of the Strong Force with the Electromagnetic Force

Yun Liu\*, Zhe Liu, Ziyi Liu

Liu Yun Studio, Department of Physics, Huanghuai University, Zhumadian Henan

Received: Aug. 23<sup>rd</sup>, 2024; accepted: Sep. 16<sup>th</sup>, 2024; published: Sep. 24<sup>th</sup>, 2024

### Abstract

In this article, Yun Liu's group in China gave a formula that can accurately calculate the mass of each quantum state of a particle by improving the Dirac relativistic wave equation, and then carried out a careful study of the mass spectrum of heavy quarkonium, calculated the internal coefficient of the strong force in each quantum state of quarkonium, and found the law of the change of the strong force with distance. After study and comparison, it is proved that the law of the strong force between

\*通讯作者。

the heavy quarkonium  $J/\psi$  particle and the  $Y$  particle completely accords with the total superposition of the relativistic effect of the charge force, which shows that the strong force and the electromagnetic force are unified. The results of Yun Liu's group also show that quarks are not point particles, have radii and spin rates, the charge number is probably an integer, and the shell structure of the heavy quarkonium is not arranged from the base.

## Keywords

Special Relativity, Quantum Mechanics, Particle Physics, Grand Unified Theory, Heavy Quarkonium

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

自然界有四种基本作用力，分别是质量引力、电磁作用力、弱相互作用力、强相互作用力，爱因斯坦总有一种直觉，认为所有力应该源于同一种基本的东西。那么，如何统一这四种力就成为物理学的一个终极目标，称为大统一理论[1]。

世界各国有很多物理学家立即专注于研究如何实现大统一的终极目标。首先，人们提出弱电统一理论，率先把弱力与电磁力统一起来[2]，为此，美国的格拉肖等七人获得诺贝尔物理学奖。大统一的路上，如此高频率地颁发诺贝尔大奖，可见，诺贝尔委员会对四力统一也足够关注和重视！

接下来，人们又开始着手研究强力与电磁力的统一，早在 1935 年，日本的汤川秀树(Yukawa)提出了介子场论，给出了强作用势能公式，预言了介子的存在，引导人们发现了诸多介子，并获得了 1949 年的诺贝尔物理学奖。1954 年，美籍华人杨振宁(Yang, C.N.)和 Robert Mills 提出局域规范不变性和最小电磁耦合原理，用来解释强相互作用。他们的研究虽然没有直接指明强力与电磁力的关系，但已经证明，强力是变系数作用力，杨振宁称之为会跑动的引力系数。1980 年，美国的 Eichten 等人在研究夸克偶素时，给势能公式加上一个待定的变化系数[3]，计算精度远高于汤川秀树的公式，对夸克偶素的研究也非常成功，这种方法被广泛使用。

早在 2012 年，中国学者刘云提出，粒子之间的强作用力就是电荷力相对论效应的总叠加。为了寻找有力证据，刘云开始组织团队专题研究。刘云小组的思路是，从研究夸克偶素入手，看夸克之间的强作用力特征是否符合电荷作用力的叠加结果。这项工作刘云小组已经坚持了 20 年之久，一直成效不大，但最近几年他们获得了一些可喜的进展，随着研究工作不断深入，强力的神秘性终于被一层一层地剥开。

为方便表述，本文采用自然单位制，光速常数和约化普朗克常数均为 1，若未注明，质量和能量数字后均以 MeV 为单位，略掉不写。由于  $n$  值很大时(本文将涉及  $n = 14$ ,  $l = 10$  的能态)，以前的能态表示法极不方便，本文采用自定义的表示法，用  $M_{14,5}$  表示粒子  $n = 14$ 、 $l = 5$  亚层的简并质量， ${}^3M_{14,5}$  表示  $n = 14$ 、 $l = 5$  的三重态质量，同组三重态数据放在方括号内，为防止逗号与数字分隔号混淆，多个质量数据用短横或分号隔开。

## 2. 计算粒子质量的精确公式

1974 年，丁肇中(Samuel C. C. Ting)和 Richter 发现了一种由正反粒子构成的重粒子偶素，被命名为  $J/\psi$  粒子，标准模型理论无法解释这个粒子由哪个夸克构成，只好临时定义一个  $c$  夸克，质量为 1500 左

右。 $J/\psi$  粒子一经发现，立即引起巨大轰动和关注，因为这个夸克偶素较为稳定，是研究强作用力的最佳粒子。人们很快测定出  $J/\psi$  粒子的 20 多个共振能级[4]-[7]，最先发现的是 3097 能态，之后是 3686 及 4040 能态，后发现 3770、3885、4025、4030 和 4160、4260、4360、4415、4421、4456、4664 能态，最后发现 2980、3415、3510、3556、3594 五个较低能态。2003 年，日本高能研究所(KEK)实验发现  $J/\psi$  粒子所谓奇特能态 3872，随后，中国发现 3823 和 3900 能态。

粒子的质量谱就像粒子的指纹一样，能很精确地反映粒子的内部结构。虽然实验上已经精确测定出  $J/\psi$  粒子有这么多质量谱，但如何分析这些数据并从中计算出强力系数，一直存在困难。首先，必须知道这些能态是哪个层级的，包括是三重态还是单态等；其次，还要有精确的计算公式，能精确地计算各量子态强力系数，如果计算误差较大，也无法找出强作用力的规律。

1916 年，索莫菲根据相对论发展了玻尔的量子论，给出氢原子的精细结构质量公式，与实验十分符合，但被人们称为旧量子论。1926 年，薛定谔给出了粒子的波动方程，通过解方程可以轻松得到粒子分立的能级，称为新量子论。海森伯立即用薛定谔方程计算出氢原子的精细能裂，但与实验值并不符合。同时，薛定谔方程用于高速率粒子时，误差也很大，即使采用高阶修正也于事无补，因此克莱因和高登等人开始尝试建立相对论波动方程，未获成功。1928 年，狄拉克改进了克莱因 - 高登方程，并通过解方程给出氢原子质量公式，和索莫菲公式不同的是，包含了电子自旋信息，称为高等量子力学[8]。1947 年，兰姆发现在氢原子中存在一些小的能差，这些能差并不符合狄拉克公式，称为兰姆位移。量子电动力学指出，兰姆位移是粒子和自己的辐射场相互作用导致，称为自能作用，贝特和费曼等人用圈图和重正化理论解决了这一问题。这种方法很难用于强作用力，计算过程也严重违反数学逻辑，受到玻尔和狄拉克等人的强烈反对。但是，这种理论对电子自旋磁矩计算相当精确，对兰姆位移的计算却并不准确。无论如何，狄拉克方程和质量公式，代表着目前量子力学的最高水平，量子电动力学代表了人类高精确的计算水准。目前，大多学者只能用狄拉克方程加相对论高阶修正的方法研究强作用力，但误差仍然很大，很难从中找出规律，因此对强作用力的研究工作一直没有实质性进展。

刘云小组研究发现，狄拉克质量公式因为包含了电子自旋信息，虽然更加精确了，但造成公式不能通用，只能用于氢原子，因为不同的粒子中自旋耦合形式是不同的。2015 年，刘云小组重新研究了粒子质量的统计规则，并改进了狄拉克相对论波动方程[9]：

$$(m + V - M)\psi_{x,y,z,t} = 0 \quad (1)$$

式中， $m$  为粒子体系内部所有轨道粒子的相对论质量之和， $V$  为所有轨道粒子之间的势能之和，相引势能统计为负值，相斥势能统计为正值， $M$  为粒子体系的静质量。根据此方程(1)可得出通用的粒子质量公式，适用于任何粒子。本文仅给出二粒子体系的质量公式，适用于精确计算所有二体粒子体系各量子态的质量：

$$M_{nlf} = \frac{m_{01}}{\sqrt{1 + \frac{a_{nlf}^2/B^2}{\left[ n - \left( l + \frac{B}{2} \right) + \sqrt{\left( l + \frac{B}{2} \right)^2 - \frac{a_{nlf}^2}{B^2}} \right]^2}}} + \frac{m_{02}}{\sqrt{1 + \frac{a_{nlf}^2/(B/b)^2}{\left[ n - \left( l + \frac{B}{2} \right) + \sqrt{\left( l + \frac{B}{2} \right)^2 - \frac{a_{nlf}^2}{(B/b)^2}} \right]^2}}, n \geq 1, B = 1 + b \quad (2)$$

式中， $n$  为主量子数， $l$  为角量子数， $m_{01}$  为粒子 1 的静质量， $m_{02}$  为粒子 2 的静质量， $a_{nlf}$  为  $n$  主层  $l$  亚层总自旋态为  $f$  时的引力系数， $b = m_1/m_2$  为轨道粒子动质量比，夸克偶素中  $b = 1$ 。为了防止近似或约化造成误差，尽量不用约化质量简化式，这对精确计算高速率自旋粒子的质量很重要。

刘云小组认为，无论是什么性质的引力形成的束缚态粒子，所遵守的波动方程和量子规则都是相同

的，因此粒子质量都必须遵守公式(2)。不同的自旋耦合态，改变的只是引力系数。根据不同的耦合方式计算出变化后的引力系数，代入公式(2)，计算结果就是每个量子态的粒子质量，这个公式自然也适用于氢原子、电子偶素以及双星体系。公式(2)的物理意义在于，公式中的粒子体系总质量  $M$ 、轨道粒子静质量  $m_0$  和引力系数  $a$  三个物理量，只要知道两个就可以精确计算出第三个物理量。对于研究强作用力来说，这是一个很重要的公式。

### 3. 夸克偶素质量谱的模拟计算与分析

夸克偶素的一些三重态也被精确地测定出来，三重态数据对于验证计算结果极为重要。之前，由于理论上的精确计算一直落后于实验，对三重态的计算结果误差较大，难以判断哪些实验数据是三重态，或者应放在哪一层级，因此无法正确计算强作用力。2023 年，刘喆终于给出了更为精确的夸克偶素三重态能裂公式：

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_{LS} &= \frac{a_{nl} g_s g_l}{2m_1^2} \frac{l(l+1)}{f(f+1)} \langle LS \rangle \left\langle \frac{1}{r^3} \right\rangle \\ A &= \frac{m_0 a_{nl}^4 g_s g_l}{8n^3 l(l+1)(2l+1) \sqrt{1-a_{nl}^2/4n^2}} \end{aligned} \right\} \rightarrow \Delta V_{LS} = \begin{cases} +Al^2/(l+2), & f=l+s \\ -A, & f=l+0 \\ -A(l+1)^2/(l-1), & f=l-s \end{cases} \quad (3)$$

式中， $f$  为粒子总角动量的量子数， $g_s \approx 2$  为夸克的自旋磁矩因子， $g_l \approx 1$  为轨道磁矩因子， $a_{nl}$  为  $n$  主层  $l$  亚层的引力系数。根据式(2)，不同亚层的三重态能裂宽度比例有严格的规律(见表 1)。

**Table 1.** Energy crack ratio of each sublayer triplet  
**表 1.** 各亚层三重态的能裂比例

	$l=2$	$l=3$	$l=4$	$l=5$	$l=6$	$l=7$
Upper crack (上能裂)	2 A	2.8 A	3.67 A	4.57 A	5.5 A	6.44 A
Under crack (下能裂)	8 A	7 A	7.33 A	8 A	8.8 A	9.67 A
Crack ratio (能裂比)	1:4	1:2.5	1:2	1:1.75	1:1.6	1:1.5

根据表 1，可以从杂乱的实验数据中分析出三重态，并正确判断这些三重态属于哪个亚层。实验发现， $J/\psi$  粒子的 3415-3510-3556 三个能级[10]，能裂比例接近 1:2，根据表 2 分析，他们应是  $l=4$  亚层的三重态。放在  $n=5$  或  $n=7$  层时，无论强力系数  $a$  和夸克质量取何值，由式(2)计算，结果与实验值都很难符合，而只有放到  $n=6$  层时，假设不同的夸克质量模拟计算时，才能得到与实验数据高度符合的三重态(见表 2)。因此，这个三重态只能是  $n=6$ 、 $l=4$  态的质量。进一步判断，3097 只能是  $n=5$  层的质量，最后计算的结果和实验值出奇地符合。

刘云小组认为，式(3)改变的只是势能，而不是粒子质量，因此还需要对式(3)进行修正，修正后的计算结果与实验数据更加符合。刘云小组给出修正后的夸克偶素三重态质量公式为：

$$M_{nlf} = \frac{2m_0}{\sqrt{1 + \frac{a_{nlf}^2}{4(l+1)^2}}} \left\{ K = \begin{cases} \left[ 1 - \frac{la_{nl}^2}{4n(l+1)(l+2)(2l+1)} \right] \frac{a_{nl}^2}{\sqrt{1-a_{nl}^2/4n^2}} & f=l+S; \\ \left[ 1 + \frac{a_{nl}^2}{4nl(l+1)(2l+1)} \right] \frac{a_{nl}^2}{\sqrt{1-a_{nl}^2/4n^2}} & f=l+0; \\ \left[ 1 + \frac{(l+1)a_{nl}^2}{4nl(l-1)(2l+1)} \right] \frac{a_{nl}^2}{\sqrt{1-a_{nl}^2/4n^2}} & f=l-S; \end{cases} \quad (4)$$

$$a_{nlf}^2 = (K^2/8n^2) \left( \sqrt{1+64n^4/K^2} - 1 \right)$$

有了公式(4)的精确计算, 实验数据才真正具有比对和研究的价值, 但是, 如果选择的夸克质量不正确, 哪怕偏差仅有 10 左右, 用公式(4)计算得出的三重态数据, 根本做不到与实验值相符(计算值与实验值差超过 2 认为不合理)。标准模型定义的  $c$  夸克质量为 1500 并不准确, 因此不断有学者对标准模型提出各种质疑[11]。为了更精准地确定  $c$  夸克质量, 刘云小组进行了大量计算和比较, 表 2 是  $c$  夸克取不同质量时, 由式(4)计算的结果比较, 篇幅所限, 本文仅显示其中一组的比较结果。

**Table 2.** Comparison of calculation results for quarks with different masses  
**表 2.** 夸克取不同的质量时计算结果比较

	$m_0 = 2250$	$m_0 = 2282$	实验值
$a_{5,4}$	$a_{5,4} = 7.222$	$a_{5,4} = 7.310$	-
${}^3M_{5,4}$	2983.6-3097.1-3151.3	2978.2-3097.6-3160.6	2979.7-3096.9-no
$a_{6,4}$	$a_{6,4} = 7.147$	$a_{6,4} = 7.291$	-
${}^3M_{6,4}$	3427.6-3511.7-3553.7	3415.3-3508.8-3555.6	3415.1-3510.5-3556.2
$a_{7,6}$	$a_{7,6} = 6.276$	$a_{7,6} = 6.611$	-
${}^3M_{7,6}$	4011.2-4023.6-4027.7	4009.0-4021.6-4029.6	4009.0-4021.5-4030.0

表 2 显示,  $c$  夸克取 2282 时更加符合实验值, 有资料显示, 普通粒子  $\Lambda_c$  粒子质量是 2286.45 [12], 但也有资料显示是 2282.2 [13]或 2284.9 [14], 计算表明,  $c$  夸克取 2282 更加符合实验值, 因此, 以下计算均取 2282 为  $c$  夸克质量。另外,  $\Lambda_c$  粒子自旋数为 1/2, 也符合实验要求。同样的方法对夸克偶素  $Y$  粒子研究, 发现  $b$  夸克的质量是 5580, 正好  $\Lambda_b$  粒子的质量和自旋数都符合, 这说明, 夸克就是这些普通粒子。但是这些普通粒子电荷都是整数, 而标准模型理论认为夸克的电荷是分数, 会不会也像夸克质量那样, 标准模型理论根本就不准确呢? 本文中公式都是按粒子电荷为 1 推导的, 用于夸克偶素时, 与实验结果高度符合, 因此刘云小组认为, 夸克的电荷数很可能就是 1, 而不是分数。这将是一个重大而有趣的研究课题, 标准模型理论已经成为物理学的主流理论, 但也可能有不完善的地方, 如果能深入研究并找到充足证据纠正错误, 对物理学的贡献也非同一般。根据式(4)计算  $J/\psi$  粒子更多三重态的质量, 见表 3。

**Table 3.** Triplet mass of the  $J/\psi$  particle calculated from Formula (4)  
**表 3.** 根据公式(4)计算得到的  $J/\psi$  粒子三重态质量

	$n = 5$	$n = 6$	$n = 7$	$n = 8$
$l = n - 1$	$a \approx 7.310;$ <u>2978-3097-3160</u>	$a \approx \underline{6.749};$ 3737- <u>3769</u> -3794	$a \approx 6.611;$ <u>4009-4022-4030</u>	$a \approx 6.572;$ 4153- <u>4160</u> -4162
$l = n - 2$	湮灭态	$a \approx 7.291;$ <u>3415-3509-3556</u>	$a \approx 7.288;$ <u>3823-3854-3872</u>	$a \approx 7.312;$ <u>4025-4040-4049</u>
$l = n - 3$	湮灭态	湮灭态	$a \approx 7.621;$ <u>3594-3679-3723</u>	$a \approx 7.747;$ <u>3900-3930-3946</u>
$l = n - 4$	湮灭态	湮灭态	湮灭态	$a \approx 8.057;$ <u>3686-3770-3811</u>

表中划线的数字是实验已经发现的能态,  $a$  值是三重态对应的强力系数, 实验值 3885 是  $n = 9$ 、 $l = 4$  的三重态, 因此没有在表 3 中。令人兴奋的是, 这都是严格依照公式计算所得, 比如实验值 3686 态很像是  $n = 6$ 、 $l = 5$  态质量, 但是如果这样依照公式计算得到的强力系数明显偏离, 不符合公式(7), 反而依据公式在  $n = 8$ 、 $l = 4$  这一亚层计算得到[3686-3770-3811]三重态。更令人兴奋的是, 在对 3097 态计算时,

意外地得到三重态伴态 2978 和 3160, 在此前实验值 2980 归为哪一态, 一直是个谜团。实验值 2979.7 态与计算值 2978.2 态, 误差小于 2, 误差可能来自实验数据, 因为所有的三重态实验数据并不能严格符合表 1 的比例, 总有稍微偏差, 这说明实验值肯定有微小误差, 这种误差在合理范围内。依据公式能直接计算得到实验数据, 也说明夸克质量取值是正确的。

计算还显示, 当  $a/2(l+1) > 1$  时, 公式(3)根号内会出现负值, 说明这个亚层为湮灭态, 轨道粒子不是撞向中心粒子裂解, 就是脱离轨道飞离, 因此对于  $J/\psi$  粒子,  $n=1, 2, 3, 4$  态都不存在, 但却存在  $n=5$  的态, 这样的粒子刘云小组称为悬空态粒子。悬空态粒子是否真的存在, 需要实验进一步验证, 如果真的存在, 将颠覆人们对量子力学的普遍认知, 因为人们对  $J/\psi$  粒子的研究中, 几乎全部都把 3097 作为  $n=1$  层排列, 认为  $n=1$  层是粒子的基态, 必须存在, 并把[3415-3510-3556]排到  $n=2$  层。但是后来又从实验上发现更低的 2980 态, 不知排在哪儿, 成为谜团。从  $n=1$  态排列, 尽管用尽各种手段消除误差[15], 模拟计算的各态质量与实验值仍相差较大, 有些态的计算结果误差高达 100 左右, 修正后误差也高达 61 (见表 4)。这种排列还造成能态位置不够用, 有好多实验数据无处可归, 被物理学界称为奇特能级[16][17]。这都说明, 以前的研究思路和方法可能真的错了。如果想验证刘云小组的模拟结果是否正确, 就看能不能再从实验上发现这些新模拟的态, 特别是那些已经发现两态的三重态伴态, 比如 3160 态, 一定存在。物理学是一个可以由实验证明的学科, 一切应以实验为准。

实验表明,  $Y$  粒子也是由正反粒子形成, 因此标准模型定义了  $b$  夸克, 质量约为 5000。用同样的方法研究, 发现  $b$  夸克质量取  $m_0=5580$  时, 计算结果与实验值才能高度相符, 比如取  $a=7.278, n=8, l=6$  代入式(4), 可得:

$${}^3M_{8,6} = [9859.2-9892.1-9912.6] \text{ (实验值为}[9859.9-9892.7-9912.6]) \text{ [18]}。$$

与此类似, 取  $a=7.608, m_0=5580, n=10, l=6$  代入式(4), 可得:

$${}^3M_{10,6} = [10233.0-10255.2-10268.9] \text{ (实验值为}[10233-10255-10269]) \text{ [18]}。$$

同时, 如果取  $m_0=5580, a=9.427, n=14, l=6$  代入式(4)可得:  ${}^3M_{14,6} = [10233.8-10255.6-10269.2]$ , 与实验值更加接近。要想正确判定这些三重态到底归哪一层, 需要取得更为精确的实验数据, 得到精确的能裂比。

无论如何, 这些三重态理论值与实验值符合程度, 同样令人叹服。目前, 世界各国很多研究小组都在模拟计算夸克偶素质量谱, 但从来没有这样高的计算精度。表 4 展示出其他研究者较为精确的计算结果[10]。

**Table 4.** Calculation results of quark even prime triplet by the scholar Mei-Hua  
**表 4.** 学者梅花对夸克偶素三重态的计算结果

粒子	层级	计算值	实验值
$J/\psi$	$n=2$	3411-3471-3557	3415.1-3510.5-3556.2
$Y$	$n=2$	9865-9884-9912	9859.9-9892.7-9912.6

表 4 是相对论修正后的结果, 其他学者的计算结果误差更大。刘云小组在  $n=1$  到 15 各层进行了大量计算和对比, 在这么高的层级才找到符合实验值的三重态, 很令人意外, 这意味着很多三重态还没有被发现, 同时, 也意味着 9460 这一态最少处于  $n=6$  层。用同样的方法对氢原子和电子偶素精确计算, 也得到与实验高度相符合的数据, 比如对氢 21 厘米射线频率的计算, 更加接近实验值, 刘云小组计算的数值为:

$$\delta M_{1,0,1-1,0,0} \approx 1.420\ 405\ 752\ \text{GHz}。 \text{实验值为 } 1.420\ 405\ 751\ 766\ 7(10)\ \text{GHz}。$$

这是目前人类最精确的实验数据之一, 国际上定时用的氢原子钟和铯原子钟就是依据这种精确测量

设计的，20 年误差不超过一秒。很多物理学家都在尝试从理论上精确计算这一频率，但是，数十年来，人们对这一频率的计算一直和实验对不上。在此之前，此项计算的最精确纪录为 1.42040340 GHz [18]。

总之，公式(3)是比较精确的，可以用这一公式精确计算夸克偶素各态的强力系数。

### 4. 结果与讨论

根据实验数据，各量子态的强作用系数都可以由公式计算出来(见表 5)，但需对比这强力系数的变化规则，判断其是不是符合电荷作用力的总叠加。刘云一直认为，如果粒子高速率自旋，粒子之间的电场作用力叠加就会形成强作用力。尽管粒子的内部实际结构十分复杂，但是总可以把带电粒子近似成三个电荷团(见图 1)。根据相对论分析，如果正反粒子自旋方向相同，总自旋  $S=1$ ，形成的引力会更大，而同种粒子自旋  $S=0$  时引力更大，因此正反粒子在总自旋 1 时更加稳定，同种粒子自旋为 0 时更加稳定，这与实验也完全相符合。图 1 所示是引力最大的方位状态，再旋转 1/4 周将是引力最小的方位状态。粒子不停地旋转，引力呈周期性振动变化。但无论如何，只要形成稳定态粒子，粒子体系与外界不再交换能量，各状态的总能态都相同，只需选择一个方便计算的状态研究，结果都是一样的。根据图 1 所示的方位状态，充分考虑相对论，把两个粒子之间所有电荷作用力叠加起来，整理得到正反夸克之间的引力为 ( $S=1$  时):

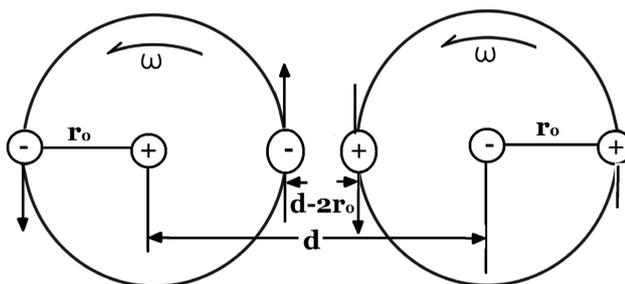


Figure 1. Approximate results of charge distribution inside the positive and negative particles

图 1. 正反粒子内部电荷分布的近似结果

$$F_{s=1} \approx \frac{a_e}{d^2} \left[ \frac{2}{\sqrt{1-v^2}} \frac{1+(2r_0/d)^2}{[1-(2r_0/d)^2]^2} - \frac{4}{\sqrt{1-v_0^2}} \frac{1+(r_0/d)^2}{[1-(r_0/d)^2]^2} + \frac{3}{\sqrt{1-v_l^2}} \right], v = \frac{2v_0}{1+v_0^2} \quad (5)$$

式中， $a_e = 1/137$  是电荷力强度系数， $v_0$  为粒子自旋速率， $v$  为自旋合成速率，遵守相对论合成规则， $v_l$  为轨道速率， $r_0$  为粒子自旋半径， $d$  为粒子之间的距离。通常人们并不认为引力是电荷作用力叠加造成，而是认为有某种强荷产生的，因此总是假想出一个强作用力系数，那么强作用力系数  $a$  的公式应为：

$$a = c_1 \frac{1+4r_0^2/d^2}{(1-4r_0^2/d^2)^2} - c_2 \frac{1+r_0^2/d^2}{(1-r_0^2/d^2)^2} + c_3 \left\{ \begin{aligned} c_1 &= \frac{2a_e}{\sqrt{1-v^2}}, c_2 = \frac{4a_e}{\sqrt{1-v_0^2}} \\ c_3 &= a_e + \frac{2a_e}{\sqrt{1-v_l^2}}, v = \frac{2v_0}{1+v_0^2} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\langle d \rangle \approx \frac{(l+1)\hbar}{v_{nl}m_0/\sqrt{1-v_l^2}}, \hbar = 1, c = 1, a_e = \frac{1}{137}$$

式中， $a$  为夸克之间假想的强力系数。前面已经确定了  $c$  夸克质量为 2282，接下来就很容易确定其它参数。实验数据表明  $J/\psi$  粒子的质量趋近 4460，代入式(3)可得，半径无限大时强力系数趋于  $a \approx 6.5$ ，再由式(6)计算得  $v_0 \approx 0.9986$  倍光速，这是由实验数据计算的  $c$  夸克自旋速率，正反  $c$  夸克之间作用力强度为：

$$a \approx 6.900 \frac{1+4r_0^2/d^2}{(1-4r_0^2/d^2)^2} - 0.449 \frac{1+r_0^2/d^2}{(1-r_0^2/d^2)^2} + 0.022 \quad (7)$$

根据实验数据判断并假设  $c$  夸克自旋半径约为 0.042 fm，再根据式(6)中的  $d$  项计算半径值，把半径值代入式(6)计算强力系数，结果见表 5。同样的方法对  $Y$  粒子计算，则  $b$  夸克自旋速率约为 0.9985 $c$ ，代入(6)式得：

$$a \approx 6.897 \frac{1+4r_0^2/d^2}{(1-4r_0^2/d^2)^2} - 0.449 \frac{1+r_0^2/d^2}{(1-r_0^2/d^2)^2} + 0.022 \quad (8)$$

假设  $b$  夸克半径约 0.043 fm，可计算各态强力系数值，表 5 是两种粒子的计算结果与实验值的比较。

**Table 5.** Comparison of calculated and experimental values of the strong force coefficients of quark couplers

**表 5.** 夸克偶素的强力系数计算值与实验值比较

		$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$	$n = 7$	$n = 8$	$n = 9$	$n = 11$
$J/\psi$	$r/\text{fm}$	-	0.201	0.380	0.561	0.749	0.991	1.455
	Ex. $a$	-	7.310	6.749	6.611	6.572	6.460	6.504
	Th. $a$	-	7.439	6.730	6.590	6.539	6.510	6.490
	$M/\text{MeV}$	-	3097	3770	4030	4160	4260	4360
		$n = 6$	$n = 7$	$n = 8$	$n = 9$	$n = 10$	$n = 11$	$n = 14$
$Y$	$r/\text{fm}$	-	0.198	0.289	0.397	0.524	0.621	1.057
	Ex. $a$	-	7.478	6.975	6.710	6.420	6.575	6.395
	Th. $a$	-	7.488	6.946	6.717	6.611	6.570	6.499
	$M/\text{MeV}$	-	9460	10,023	10,355	10,573	10,650	10,865

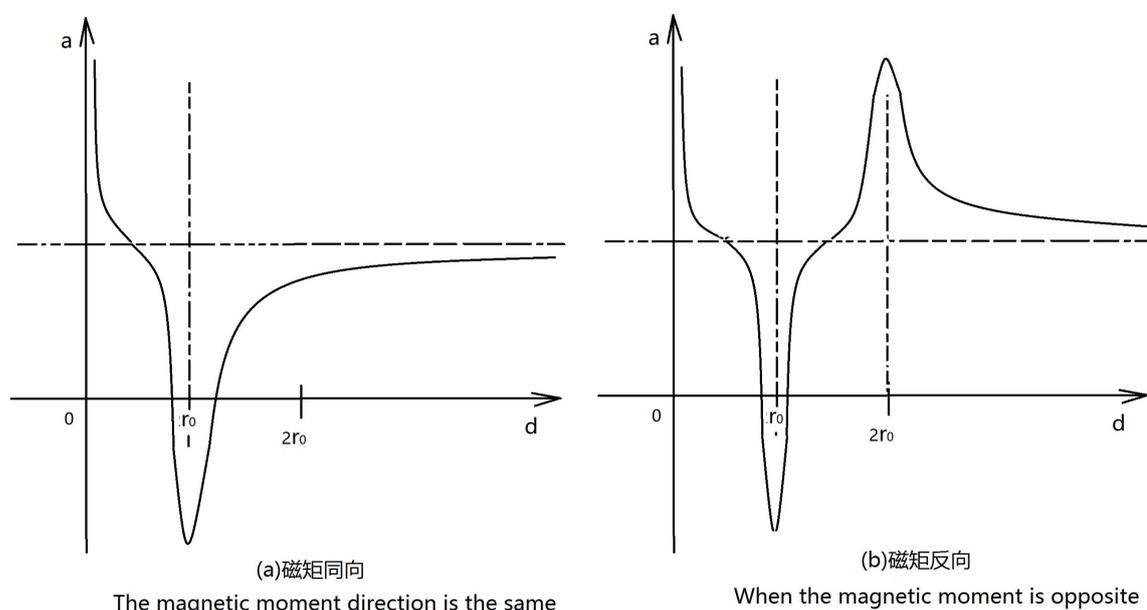
表中 Ex.  $a$  是由实验数据推算的强力系数，Th.  $a$  是由公式(7)计算的理论值。从表 5 看，夸克偶素中夸克之间的强作用力特征和电荷力的相对论叠加效应完全相符。有些态误差较大，原因是这些实验数据可能是三重态的一个，并不是中间态。对夸克的自旋速率和半径假设得不够精准时，也会造成误差较大，适当调整这两项数值后，可以减小误差。但是，表 4 的数据足以说明，引力系数的变化基本符合电荷力叠加结果。

在  $l$  值越小的态，计算所得强力系数  $a$  越大，与实验基本相符，但是计算发现， $l$  越小的态误差也越大，分析认为，兰姆位移的影响是原因之一。还有些实验数据明显偏大，比如  $J/\psi$  粒子的 4664 能态，依公式无法计算得到。分析认为，实验往往采取超高能轰击的手段，因此夸克也可能被轰击到激发态，比如 3/2 自旋态，这时的夸克质量变大，形成的夸克偶素质量也会偏大，因此会显得偏离公式计算值。

依据公式(7)估算， $J/\psi$  粒子的  $n=4$  层引力系数肯定超过 8，因此  $n=4$  层轨道速率超光速不存在。但  $Y$  粒子  $n=6$  层也不存在吗？从表 5 看， $n=6$  层就算是沿用  $n=7$  层的半径  $r_l$  类推，最大半径也只能为  $36r_l/49=0.145$  fm，由式(8)计算强力系数为 7.9，再将  $a \approx 7.9$  代入式(5)  $d$  项得  $d \approx 2 \times 0.063$  fm，再代入式(8)校正强力系数，如此循环逼近，看最后能否稳定，如果不能稳定，就只能是湮灭态。计算表明， $Y$  粒子  $n=6$  层不能稳定，因此也是湮灭态。

从式(6)可知，假想的强力系数是随距离  $d$  变化而变动的，因此杨振宁称强作用力系数是跑动的，美国的 Eichten 等人在研究夸克偶素时采用了变系数势能公式，才得到更加精准的计算结果。根据式(6)推导，当带电粒子自旋速率不高时，粒子之间的电荷力占主要地位，相反，当自旋速率很高时，粒子之间

的电场发生畸变, 叠加引力变得很强大, 从而形成强作用力。计算表明, 当自旋速率达到 0.99 倍光速率时, 作用力系数将是静电荷作用力系数的 500 倍左右, 足以形成强作用力。不带电粒子自旋速率很大时, 同样具有强作用力, 中子和质子之间的作用力仅为电荷作用力的 13.4 倍。推导还显示, 自旋速率很小时, 粒子之间的电荷力叠加后也并不为零, 只是很弱小, 这就是质量引力, 刘云小组称之为磁粉效应, 从外表看两个磁粉团, 没有电荷, 但却具有电荷叠加的引力, 篇幅有限, 本文暂不讨论质量引力。如果根据式(6)对粒子距离和引力系数值作图(见图 2), 那么强作用力所表现出的相近自由现象以及硬芯现象都能直观地看到。所谓的相近自由, 就是在某些距离上, 粒子越靠近引力反而越小; 所谓硬心, 就是靠近到某一距离时出现巨大斥力。



**Figure 2.** Relationship diagram between strong force coefficient  $a$  and particle distance  $d$   
**图 2.** 强力系数  $a$  与粒子距离  $d$  的关系图

根据图 1 分析, 夸克偶素  $S=0$  时, 称为赝标量粒子, 引力系数符合图 2(a)。粗略估算,  $S=0$  时, 也会在近距离形成一些偏离公式(6)的粒子能态, 而在远距离时形成与  $S=1$  时质量十分相近的质量态, 因实验数据太少, 且赝标量粒子又是单态, 缺少与实验值的比较, 很难验证模拟计算是否正确, 因此本文暂不研究赝标量粒子。对质子和中子的引力进行研究, 和图 2 情况基本类似。由图 2 可知, 在较远的距离时, 强作用力系数会趋于某恒定值, 正是这种原因, 核内质子和中子才能形成稳定的壳层结构, 好像有强荷存在。

## 5. 结论与展望

综上所述, 刘云小组的研究已经表明, 夸克偶素内, 强作用力系数是随距离变化的, 其变化规律完全符合粒子之间电场力相对论效应的叠加, 实验值和理论值高度符合, 理论上推导得到的相近自由和硬芯现象也与物理实验完全相符合, 这足以说明强作用力与电磁力也是统一的。研究还表明, 夸克并不是点粒子, 具有明确的半径和自旋速率。

核能是宇宙中最具潜力的能源, 但由于核能的不可控性, 人类很难利用和开发这种能源。然而, 随着强相互作用之谜的解开, 对核能反应的催化和减缓将取得进展。粒子的作用力强度与自旋速率密切相关。

关,如果能创造一个高强度的旋转磁场来改变粒子的自旋速率,从而改变粒子的相互作用强度,就能改变粒子释放能量的概率和速度,实现可控核反应,为人类进入宇宙提供足够动力,这将是很有前景的研究方向。

另外,质量引力也有可能是电荷力叠加的结果,四种基本作用力大统一的终极目标已经不远,届时,人类将全力研究电子结构和电荷的形成,彻底弄明白电荷之间作用力强度为什么接近  $1/137$ ,费曼称之为物理学中最大的谜,即所谓的 137 之谜。

## 致 谢

感谢清华大学徐湛教授、王青教授、张智教授提供的帮助和指导,感谢国家图书馆提供的支持!

## 参考文献

- [1] 张一方. 相互作用的各种统一和新的相互作用[J]. 商丘师范学院学报, 2018, 34(3): 16-21.
- [2] 石建磊, 张海莉. 电弱理论的发展和统一[J]. 科学之友, 2012, 10(15): 126-127.
- [3] 卢希庭. 原子核物理[M]. 北京: 原子能出版社, 2000: 382-383.
- [4] 潘峰, 姜红. 重夸克偶素质量谱的数值计算[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 1989, 10(3): 29-31.
- [5] 王慧. 手征夸克模型下的粲夸克偶素谱研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2017.
- [6] 黄琦. 用强子圈机制研究重夸克偶素的强子跃迁[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [7] 谢勇. D 波粲偶素态  $U_2(3823)$  的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2023.
- [8] 喀兴林. 高等量子力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 206-207.
- [9] 刘云, 刘喆, 刘子轶. 夸克偶素质量谱新研究[C]//2023 中国成都国际学术会议. 2023: 132-139.
- [10] 梅花. 相对论夸克模型对重夸克偶素质量谱的研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南师范大学, 2004.
- [11] 夏冰. 物理学标准模型路在何方? [J]. 世界科学, 2021(6): 14-15.
- [12] 徐克尊, 陈向军, 陈宏芳. 近代物理学[M]. 合肥: 中国科技出版社, 2015: 369-370.
- [13] 王永昌. 近代物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 324-325.
- [14] 赵云辉, 海文华, 朱钱泉. 重夸克偶素的高阶变分-积分微扰修正[J]. 物理学报, 2009, 58(2): 734-739.
- [15] 王俊璋. 类粲偶素 XYZ 粒子和奇异夸克偶素性质的研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [16] 杨一凡. 类粲夸克偶素奇特态的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2021.
- [17] [美]大卫 J. 格里斯, 著. 粒子物理学导论[M]. 王青, 译. 北京: 机械工业出版社, 2018: 127-130.
- [18] 杨福家. 原子物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014: 390-391.