

# 核子之间的强相互作用——核力

魏安赐

(河北工业大学应用数理系 天津 300130)

## 一、核力的概念

在原子核内,带正电的质子之间的距离很近,库仑斥力很强.但是质子、中子仍然紧密结合,质量密度达到  $6 \times 10^{14} \text{gcm}^{-3}$ . 足见核子之间存在比电磁力更强的强相互作用,就是核力.

## 二、核力的性质

### 1. 核力的强作用性

核子间的万有引力势能为  $10^{-36} \text{MeV}$ , 质子和中子的磁作用势能为  $0.03 \text{MeV}$ , 而核力最弱的氘核里质子和中子的结合能尚为  $2.225 \text{MeV}$ . 电子与质子相距  $2 \times 10^{-13} \text{cm}$  时, 库仑吸引能为  $0.7 \text{MeV}$ ; 而两核子相距  $2 \times 10^{-13} \text{cm}$  时, 核力吸引能则达到  $30 \text{MeV}$ .

若万有引力恒量为  $G$ , 质子质量为  $m_p$ , 普朗克恒量的  $1/2\pi$  为  $\hbar$ , 则引力相互作用耦合常数

$$G_n = \frac{Gm_p^2}{\hbar c} \approx 5.9 \times 10^{-39}$$

若费米耦合常数为  $G_F$  ( $\approx 1.3 \times 10^{-4} \text{MeV} \cdot \text{fm}^3$ ), 则弱相互作用(如  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ ) 的耦合常数

$$\frac{G_F m_p^2 c}{\hbar} \approx 9 \times 10^{-6} \approx 10^{-5}$$

电磁相互作用的耦合常数——精细结构常数

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx 1/137.03604 \approx 7.29735 \times 10^{-3}$$

若核子的唯象强荷为  $g$ , 则核子之间强相

互作用的耦合常数

$$\frac{g^2}{\hbar c} \approx \begin{cases} 14.4 (\text{自由态核子间}) \\ 0.08 (\text{核内核子间}) \end{cases} \left. \begin{array}{l} \text{以 } \pi \text{ 介子为交换媒介} \\ \text{以 } \rho \text{ 介子为交换媒介} \\ \text{以 } K \text{ 介子为交换媒介} \end{array} \right\}$$

核力的强度随核子的状态和彼此交换的中间媒介的不同而不同, 它是电磁利用强度的  $10-10^3$  倍. 核内核子间的核力强度约为电磁作用强度的 11 倍, 足以克服质子之间的库仑斥力.

### 2. 核力的短程性

若  $m_\pi$  是  $\pi$  介子平均质量, 则核力平均力程

$$R = \frac{\hbar}{m_\pi c} \approx 1.4 \times 10^{-13} \text{cm}$$

甚至比原子核线度还小. 核子只能在核力力程内, 和邻近核子强烈作用; 在核力力程外, 如核子间距超过  $(3-5) \times 10^{-13} \text{cm}$  时, 核力极弱乃至消失.

### 3. 核力的饱和性

原子核结合能  $B$  近似和质量数(核子数)  $A$  成正比. 每个核子的平均结合能  $\bar{\epsilon} = \frac{B}{A}$ , 在  $30 < A < 120$  范围内约为  $8.6 \text{MeV}$ , 基本上不随  $A$  而变化; 在  $A > 120$  的重核中, 随  $A$  的增大而缓慢减小. 中子与复杂核的相互作用势和中子与单个核子的相互作用势数量级相同. 这表明: 原子核内的每个核子, 只同核力力程内的邻近几个核子发生核力作用, 而不是同核力力程

上. 做为科研上的一把金钥匙, 我打开了一个个新发现的大门, 诞生了许多新的学科, 如: X 射线晶体学、X 射线光谱学、X 射线天文学等等. 人们对我的认识不断地深入, 同时也不断开拓新的应用领域, 如 X 射线激光就是目前激光物理与等离子体物理中的一个重要的研究

领域; X 射线全息术也是目前一个方兴未艾的研究领域和正待开发的全新的应用领域, 随着科学和技术的发展, 人类将借助我“微弱”之光的窗口看到物质世界许多新奇的景象, 为人类展现一幅幅绚丽的“X 光”图象.

内的其余所有核子发生核力作用。该性质称为饱和性。

#### 4. 核力的成对性

实验发现: 1)  $A \leq 40$  的轻核中, 质子数与中子数相等的核(如  ${}^4_2\text{He}$ 、 ${}^8_4\text{Be}$ 、 ${}^{12}_6\text{C}$ 、 ${}^{16}_8\text{O}$ 、 ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ 、 ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ ) 的比结合能  $\bar{\epsilon}$  达到极大值。2) 质子和中子都是偶数的偶偶核的稳定性, 高于质子和中子 - 为奇数 - 为偶数的奇 A 核, 更高于质子和中子都是奇数的奇奇核。3) 质量数为 4 的整数倍的偶偶核 ( ${}^8_4\text{Be}$  除外) 比一般偶偶核更稳定。4) 原子核壳层的最大核子数——幻数 2、8、14、20、28、50、82、126 都是偶数; 质子数和中子数都是幻数的双幻核的质量数都是 4 的整数倍, 它们特别稳定。这表明: 1) 每个质子最多只能和两个自旋反平行的中子紧密结合, 每个中子最多只能和两个自旋反平行的质子紧密结合。2) 轨道量子数  $l$  相同而自旋相反的两个同类核子紧密结合,  $l$  不同而自旋或平行或反平行的两同类核子间核力较弱。

#### 5. 核力的电荷无关性

实验发现: 1) 原子核完满壳层中的质子数和中子数相等。2) 质子数和中子数彼此交错相等的镜像核(如氘  ${}^2_1\text{H}$  和氦  ${}^3_2\text{He}$ ) 具有几乎相同的结合能(其结合能差仅为库仑能差)、相似的能级分布和相同的自旋。3) 在轨道量子数  $l$  和自旋量子数  $S$  分别相同时,  $p-p$  散射与  $n-p$  散射的相角相同、散射长度相近、有效力程相同; 在  $l=0, S=0$  的  ${}^1S$  态, 相互作用能都近似为  $11.9\text{MeV}$ 。4) 入射核子能量相等时, 在所有散射角下,  $p-p$  和  $n-n$  弹性散射的微分截面和总截面分别相等。5)  $p-p$  和  $n-n$  散射中, 在介子生成阈(产生介子至少需要的最低能量)附近,  $\pi^0$  介子的产生都被禁戒, 且禁戒都随入射核子能量增大到某值而消失, 该值在  $n-n$  中高于在  $p-p$  中。

1932 年, 德国海森伯指出: 在原子核内, 状态相同的质子和质子、质子和中子、中子和中子之间的核力相等, 与其是否带电无关。这在 1937 年为实验证实, 1946—1955 年间为更精确的实验证实。  $F_{pp} = F_{nn}$  和  $F_{pn} = F_{np} = F_{pp}$  的准确

性分别大于 99% 和 98%。从而核力与电荷无关。

#### 6. 核力的交换性

能量在 70—200MeV 的快速中子被质子散射时, 垂直方向的大角散射比向前的小角散射占优势。入射中子与靶质子相撞时, 中子转化为质子并沿原来入射方向运动; 被撞质子转化为中子, 并沿与入射方向大致垂直的方向射出, 即大角散射。质子和中子在散射时交换带电状态。

按照核力的介子场论,  $\pi$  介子是自旋量子数为零的玻色子, 可以单个传输。质子和中子通过交换虚态(不能观察)的  $\pi^+$ 、 $\pi^-$  和  $\pi^0$  介子发生核力作用; 质子和质子、中子和中子通过交换虚态  $\pi^0$  介子发生核力作用。核子之间交换虚态中性  $\pi$  介子  $\pi^0$  时, 荷电状态和自旋方向都不变所对应的核力, 称为寻常力或非交换力, 也称为维格纳(Wigner)力; 荷电状态不变而自旋方向交换所对应的核力, 称为自旋交换力, 也称为巴特勒特(Bartlett)力。质子和中子交换虚态带电  $\pi$  介子  $\pi^+$  或  $\pi^-$  时, 荷电状态交换(质子变中子、中子变质子)而自旋方向不变所对应的核力, 称为电荷交换力或位置交换力, 也称为马喇纳(Majorana)力; 荷电状态和自旋方向分别交换所对应的核力, 称为电荷——自旋交换力或位置——自旋交换力, 也称为海森伯(Hersenberg)力。

在低能过程或  $l=0$  的  $S$  态中, 主要的核力是非交换力或电荷交换力。而自旋交换力和电荷——自旋交换力, 在氘核单态  ${}^1S$  和三重态  ${}^3S$  上引起势能的不同符号, 但是不起主要作用。

核力的交换性引起饱和性: 在某一时刻, 每个核子只能同时吸收和放出有限数目的虚态  $\pi$  介子, 从而只能和核力力程内有限个最邻近的核子发生交换虚态  $\pi$  介子的核力作用。

#### 7. 核力的近距排斥性

${}^4_2\text{He}$  核结合能的实验值明显小于假定核力为纯吸引力而算得的理论值, 从而其四个核子结合的紧密程度, 比核子间只有纯吸引力时要显著松弛。核子间不仅存在吸引力, 而且还存在排斥

力。\$^1\_1\text{H}\$、\$^2\_1\text{H}\$、\$^3\_2\text{He}\$ 的核子数较少,核子间的吸引力尚未强到使核子彼此极为接近,排斥力还没发挥显著作用,这三种核各自结合能的实验值只稍小于理论值。因此排斥力比吸引力的力程更短。核子间的距离小于 \$0.8 \times 10^{-13}\text{cm}\$ 时,就出现短程强排斥力(排斥心),阻止其继续接近。

#### 8. 核力的能态相关性

在其它因素相同的情况下,处于同一能级的核子比处于不同能级的核子,核力更强。

#### 9. 核力的自旋相关性

实验发现:1)氘核只有三重态,没有单态。这表明:质子和中子自旋平行从而氘核自旋量子数

$S = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$  时核力强,足以形成  $2S + 1 = 3$  的三重态束缚态;质子和中子自旋反平行从而氘核自旋量子数  $S = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$  时核力弱,

不足以形成  $2S + 1 = 1$  的单态束缚态。2)在方形势阱半径  $r = 2.1 \times 10^{-13}\text{cm}$  的情形下,轨道角量子数  $l = 0$  的质子和中子,当其自旋平行时,势阱深度(核子相互作用势对核子间距的函数绝对值的最大值)  $V_0 = 33.6\text{MeV}$ ; 当其自旋反平行时,  $V_0 = 21.6\text{MeV}$ 。从而质子和中子自旋平行时核力较强。3)热中子(其动能接近热运动动能的低速中子)被正氢分子(其中两质子自旋平行)散射的截面,是其被仲氢分子(其中两质子自旋反平行)散射的截面的 30 倍。4)能量在  $300\text{MeV}$  以下的  $p-p$  和  $n-p$  散射中,总自旋量子数为零的  $^1S$  态的强作用半径  $r_0 = ae^{-b\sqrt{E}}$ ; 其它各自旋态的  $r_0$  都不随能量变化。

处于同一能级上的两个同类核子间的核力,自旋反平行时为吸引力;自旋平行时为排斥力。处于同一能级上的质子和中子间的核力,无论它们的自旋平行还是反平行,都是吸引力,并且自旋平行时比自旋反平行时吸引力更强;核力使同一能级上的质子和中子倾向于处在自旋平行的态。

#### 10. 核力的同位旋相关性

同位旋  $I$  是表征静质量极接近、对参与的相互作用贡献相同从而属于同族的粒子种数  $n$

的量子数,粒子种数为  $n$  的粒子族的同位旋  $I = \frac{n-1}{2}$ ,它只取分立正值(包括整数和半整数)或零。同位旋第三分量  $I_3$  是表征同族中每种粒子的类别和带电状态的量子数,它只取包括  $I$  与  $-I$  及其间依次相差 1 的  $(2I+1)$  个分立数值  $I, I-1, \dots, -I$ 。

入射核子与靶核子的两核子体系,在  $I = 1$  的状态,核子弹性散射截面基本上不随其能量变化,核力强度与核子能量无关。在  $I = 0$  的状态,该截面随入射核子能量的增大而减小,核力强度随核子能量的增大而减弱。

#### 11. 核力的宇称相关性

宇称是表征描述粒子和微观体系状态的波函数在空间坐标反演时符号改变或不变的性质(即镜像对称性的奇偶关系)的量子数。原子核中处于不同宇称态的核子具有不同的核力势能。

#### 12. 核力的存在状态相关性

实验发现:中子-质子( $n-p$ )散射微分截面  $\sigma_{np(\text{核内})} \approx 2/3 \sigma_{np(\text{自由})}$ ,中子-中子散射微分截面  $\sigma_{nn(\text{核内})} \approx 3/4 \sigma_{np(\text{自由})}$ 。从而核内两核子间的核力比核外两个自由核子碰撞时的核力小。

#### 13. 核力的速度相关性

$n-p$  散射中,中子的动能分别为  $10\text{MeV}$ 、 $100\text{MeV}$ 、 $200\text{MeV}$  时,核力势能绝对值依次约为  $50\text{MeV}$ 、 $20\text{MeV}$ 、 $10\text{MeV}$ ,从而速度越大的自由核子与核内核子间的核力越小。这是因为核力势能

$$V(r) = -V_0 + \beta \frac{\mathbf{p}_l \cdot \mathbf{p}_s}{r^2}$$

核子速度越大,轨道角动量  $\mathbf{p}_l$  越大,轨道运动与自旋的耦合越强,  $\mathbf{p}_l \cdot \mathbf{p}_s$  越大,  $|V(r)|$  与核力越小。

#### 14. 核力的静动双重性

两核子间的静型核力,是核力场产生的随距离增大而减弱较慢的吸引力或近距排斥力。动型核力是核子的快速运动产生的随距离增大而减弱较快且力程极短的惯性排斥力,它阻碍核子彼此接近,并与核子的种类、量子态无关。

### 三、核力的成分

#### 1. 两体力

两体力是两个核子之间的核力。

### (1) 中心力(有心力)

中心力是方向沿两核子连线、强弱只与其距离有关的核力。它是核力的主要成分,但是纯中心力不能引起核子散射的极化。

### (2) 非中心力(非有心力)

非中心力是方向不沿两核子连线、强弱不仅与其距离有关的核力。它是准“磁性”核力,强度较弱,是核力的次要成分。它是核子和具有某些自旋性质(如偶极性质)的介子场耦合的结果。

#### ① 自旋轨道耦合力

自旋轨道耦合力是每个核子的自旋和轨道运动耦合成的总角动量之间的耦合力(表示为  $j-j$  耦合力)。它表现在:核子总角动量间的耦合形成的原子核能级,原子核双满壳层外单个核子能级的分裂,高能中子在原子核上散射后发生部分极化,原子光谱的超精细结构等。

#### ② 张量力

张量力是不仅和核子间距  $r$  有关,而且和核子的自旋方向与核子间矢径的夹角  $\theta_1, \theta_2$  有关的非中心力。它存在的证据是:1) 氘核的磁偶极矩不等于质子和中子的磁偶极矩之和。2) 若氘核内只有中心力,则其基态是完全球对称的纯粹 S 态,  $\overline{x^2} = \overline{y^2} = \overline{z^2} = \overline{r^2} / 3$ , 磁偶极矩  $Q = K(3\overline{z^2} - \overline{r^2}) = 0$ 。但实验测定氘核的  $Q = 2.73 \times 10^{-27} \text{cm}^2$ 。3) 若氘核内有张量力,则总角动量  $p_j$  守恒,总角量子数  $J$  是本征值而唯一确定;轨道量子数  $L$  不是本征值,可以有 S 态对应的  $L = 0$  和 D 态对应的  $L = 2$  并存。实验发现氘核基态恰是 S 态基态和 D 态基态的混合。4)  $n-p$  和  $p-p$  散射中  $90^\circ$  附近散射粒子角分布的不对称性。5) 高能核子散射后发生部分极化(自旋向上和向下的数目不相等),只有非中心力才能引起极化。

若两核子自旋平行,当自旋与两核子间矢径平行时,张量力为吸引力;当自旋与两核子间矢径垂直时,张量力为排斥力。若两核子自旋反平行,则张量力为零。两核子间的张量力在核力中的比率,氘核高于多个核子组成的核。

### 2. 多体力

多体力是三个或更多核子组成的原子核中

各个核子间不能简单分解为各对核子间核力之和的错综交叉的相互作用力。该原子核的核力相互作用总势能,不等于核内各对核子间核力相互作用势能之和。多体力的位势与核内所有核子的力学量(如矢径)有关。若多体力的力程比两体力更短,则多体力在核中只占次要地位。

## 四、核力的理论

### 1. 核力的唯象理论

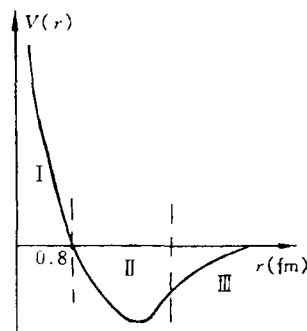
(1) 从分析有关的实验数据出发,求出最大限度地反映实验事实的近似的核子相互作用势在对原子核结合能、核子散射截面、角分布和相移(表征粒子运动状态的位相的变化)等实验数据,进行包括对称性考虑的理论分析的基础上,建立核子间相互作用位势对核子间距及其它力学量的函数关系式,使之最大限度地符合实验事实,以阐释核力的性质及其表现。

能较精确符合二体散射数据的核力势,和两核子距离、自旋耦合状态及两核子系统空间波函数的宇称有关,称为唯象真实核力。由于形式复杂,不便计算,往往采用形式较简单的唯象核力势函数,在计算中调节其中一些可调参数,以符合实验结果,称为唯象有效核力。

核子中心力作用势,在唯象理论发展前期,曾有方阱势、指数势、高斯势、汤川势等;在唯象理论发展近期,曾有哈梅达和约翰逊势(1962)、瑞德势(1968)和巴黎势(1975)等。大体表明:两核子间的两体核势与核子间距离  $r$  的函数关系曲线——核势位形如图所示,可分为三段。

#### ① 短程区(I区)

两核子间距  $r < 0.8 \text{fm}$  时,核力是短程强排



两体核势与核子间距的函数图象

斥力,有一个排斥心,阻碍两核子进一步接近.

### ②中程区(Ⅱ区)

两核子间距  $r$  为 0.8—2fm 时,核力是中程强吸引力.  $r$  为 0.8fm 时,强排斥力和强吸引力相等. 区中存在最大吸引势,数量级  $10^2\text{MeV}$ , 对应  $V(r)$  最小值.

### ③长程区(Ⅲ区)

两核子间距  $r$  为 2—3fm 时,核力是长程较弱吸引力.  $r$  在 4—5fm 以上时,核力基本消失.  $r > 10\text{fm}$  时,核力完全消失.

(2)从分析有关的实验数据出发,考察核力的各种成分的存在条件和相对比率

自旋轨道耦合力的核势形式为  $V_{LS} = V_{LS}(r)\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_1$  和  $\mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_{1s} + \mathbf{p}_{2s}$  分别为二核子相对运动轨道角动量和总自旋角动量. 张量力的核势形式为  $V_T = V_T(r)S_{12}, V_T(r)$  是中心力核势, 与二核子连线矢径  $\mathbf{r}$  方向(单位矢量  $\hat{\mathbf{r}}$ )有关的量  $S_{12} = 6(\mathbf{p}_1 \cdot \hat{\mathbf{r}})^2 - 2p_1^2$ .

两核子自旋反平行时,  $S = 0, \mathbf{p}_s = 0, S_{12} = 0$ , 自旋单态没有自旋轨道耦合力和张量力. 两核子自旋平行时,  $S = 1, \mathbf{p}_s \neq 0, S_{12} \neq 0$ , 自旋三重态有自旋轨道耦合力和张量力.

氘核基态可以是三重态  ${}^3S_1$  和  ${}^3D_1$  的混合态. 由氘核磁矩定出  ${}^3S_1$  态约占 96%、 ${}^3D_1$  态约占 4%. 从而核力是以中心力为主,混有少量非中心力.

## 2. 核力的介子理论

1935年,日本汤川秀树为了解释核力的机制和性质,创立了核力的介子场论.

### (1)核子通过交换介子而发生核力作用

核子间的核力,是通过传递介子场的量子——虚介子而产生的. 即核子发射虚介子,被另一核子所吸收,而彼此发生核力作用.

设原点处的核子带有唯象强荷  $g$ ,核势函数  $\Phi = \Phi(r)$  是球对称的,  $m_0$  是介子的静质量. 静核势场的克莱因-戈登方程的极坐标表示为:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{d\Phi}{dr} \right) = \left( \frac{m_0 c}{\hbar} \right)^2 \Phi - g\delta(r)$$

当  $r = 0$  时,  $\delta(r) = 1$ ; 当  $r \neq 0$  时,  $\delta(r) = 0$ . 该方程的解——静中心力场的核势函数

$$\Phi = g e^{-\frac{m_0 c}{\hbar} r} / r \approx g e^{-r/r_0} / r$$

核力力程  $r_0 \approx \frac{\hbar}{m_0 c}$ .  $\Phi$  随场点对核子的距离  $r$  的增大而急剧减小并趋于零,表征短程力.

若  $r_0 \approx 1.4\text{fm}$ , 则被交换的虚介子的静质量  $m_{\text{介}} = \frac{\hbar}{cr_0} \approx 140\text{MeV} / c^2 \approx 275m_e$ . 1947年,英国鲍威尔用照像乳胶在宇宙射线中发现汤川秀树预言的介子,包括  $\pi^+, \pi^-$  和  $\pi^0, m_{\pi^+} = 273.3m_e \cdot m_{\pi^0} = 264m_e$ .

质子和中子可以交换带电  $\pi$  介子,一个质子放出一个  $\pi^+$  介子而被一个中子所吸收,则质子变为中子,中子变为质子,  $p \rightarrow n + \pi^+$ ; 一个中子放出一个  $\pi^-$  介子而被一个质子所吸收,则中子变为质子,质子变为中子,  $n \rightarrow p + \pi^-$ . 质子和中子也可以交换中性  $\pi$  介子,一个质子放出一个  $\pi^0$  介子而被一个中子所吸收,或者一个中子放出一个  $\pi^0$  介子而被一个质子所吸收,则质子仍为质子、中子仍为中子,  $p \rightarrow p + \pi^0, n \rightarrow n + \pi^0$ . 同类核子间的核力,只是由交换  $\pi^0$  介子所引起,并且核子保持各自原来的面貌.

### (2)不同区域核力通过不同类型的介子交换

中心力中的长程弱吸引力,是由于两核子间的单  $\pi$  交换,即两个基态核子传递一个  $\pi$  介子. 中程强吸引力来自两核子间的双  $\pi$  交换,即第一个核子将  $\pi$  介子传递给第二个核子,后者跃迁到激发态——核子共振态  $\Delta$ , 然后再将  $\pi$  介子传回前者,并跃迁回基态. 短程强排斥力,有人试图用多  $\pi$  交换或自旋量子数为 1、质量更大 ( $770-1000\text{MeV} / c^2$ ) 的矢量介子 ( $\rho, \omega$  等) 交换描述,但任何介子交换都无法解释短程排斥心.

## 3. 核力的夸克理论

夸克禁闭在强子内部,不能以自由态单独存在. 禁闭起源于夸克间胶子的多重交换效应.

夸克的种类形象地比拟为味道. 每一味夸克按其强相互作用中的状态,可以区分为三种不同的态,称为颜色三重态. 每一种态具有一种色荷. 每味夸克都分别具有三种色荷,形象地比拟为颜色中的三基色——红、绿、蓝. 每

## 究竟有没有宇宙文明?

刘乃汤

(安徽教育报刊社 合肥 230022)



生命是地球上物质组织的最有趣的形态,而地球是人类已发现的宇宙中迄今所知唯一存在高级生命和智慧文明的星球。于是,自然而然地产生了一个问题:地球之外的茫茫宇宙之中,究竟有没有高级生命?究竟有没有文明世界?这是人类自古以来就非常关心的问题。

世界各地古往今来都有关于“外星人”的神话或传说,而哲人的描述更是非同一般。18世纪德国伟大的哲学家康德曾用诙谐而深邃的语言写道,有那么一些生长在乞丐头上森林中的生物,长期以来一直把自己的住处当作一个其大无比的球,而且把自己看作是造化的杰作。有一天,其中一个天生聪明的、它们一类里的小

味反夸克也都分别具有三种反色荷,形象地比拟为三基色的补色——青蓝(反红色)、洋红(反绿色)、淡黄(反蓝色)。某种色态的夸克和相反色态的反夸克,所带色荷彼此互为补色,它们的组合等效于无色这单一的色态,称为色单态。

两核子可看作6个夸克分两个集团组成的系统。在核力的短程区,两核子的德布罗意波部分重叠的区域内,夸克不可分辨导致两核子只有一部分夸克。核力是通过交换色单态的夸克-反夸克对、夸克与胶子以及双胶子实现的。主要是前两种交换,双胶子交换的贡献较小。交换夸克与胶子引起的强作用,和夸克的味道有关。仍处在核子内色禁闭场中被交换的夸克-反夸克对,可组合成各种等效介子组态。

两核子分离时,带有色荷的夸克和胶子,由于受到核子内色禁闭场的羁绊,从而不能从一个核子传播到与之分离的另一核子,核子间夸克及

胶子,意外地看见了一个贵族的头,它立即将住处中所有的滑稽家伙叫在一起,狂喜地告诉它们:我们不是整个自然界唯一的生物,你们看,这是一个新的大陆,里面住着更多的虱子。

事实上,放眼广袤无垠的宇宙,任何人都都会在直觉上毫不怀疑外宇宙生命和宇宙文明的存在。因为,在宇宙中,类似太阳的恒星实在太多!据天文学的研究,仅仅我们的太阳系所在的银河系,就有二、三千亿颗恒星,其中与太阳系结构十分相似的恒星系统就有上千万个之多。天文学家估计,我们的宇宙中存在着 $10^{11}$ 个类似于银河系的恒星系。如此众多的宇宙小岛,如果只有地球才是唯一的生命家园和文明世界,似乎才真是令人难以置信。

既然如此,人类就不能仅仅停留于对宇宙生命和宇宙文明的猜想和假说,而是要利用人类所掌握的知识和技术,积极主动地搜寻它、发现它。

胶子的交换消失。夸克-反夸克对在从核子内部通过核子表面的相变区(存在状态变更的区域)时,夸克和反夸克之间的低能软胶子(能量和速度低从而比较“疲软”的胶子)交换效应增强,使其相互吸引增强、间距缩小。对应其不同对称性结构,夸克和反夸克将彼此束缚形成不同的“真实”介子态,并从一个核子表面发射出来,被另一核子所吸收,使两核子发生核力作用。

核子间的强相互作用——核力,实质是核子内夸克间的基本强相互作用——色相互作用的剩余效应。在核力的中程区和长程区,相当于核子间交换由夸克-反夸克对组成的虚态介子。核子间通过交换介子发生核力的实质是:核子间交换的介子中的夸克和反夸克,与核子中的夸克之间交换胶子而发生色相互作用的整体对外表现。

核力的夸克理论在阐释核子间的短程排斥力(排斥心)上,还有待于进一步探索和深化。