



世纪交替期物理学 的两大困惑

·刘连寿

- 物质结构的新层次
- 夸克禁闭
- 相互作用的规范理论 电磁场
- 相互作用的规范理论 杨米尔斯场
- 对称性自发破缺 希格斯机制
- 困惑与方向

本世纪快要结束,新世纪即将到来.物理学的状况如何?存在什么问题?可以用八个字来概括,那就是:

成就辉煌,困惑难解.

这预示着,在新世纪里,物理学将有一个新的飞跃.

回顾一下历史会很有启发.在19世纪和20世纪的交替期,物理学的成就也曾经是十分辉煌.奇迹般地实现了电和磁的统一,发现了电磁波,发现了放射性,发现了电子,……但是,与此同时,也产生了两大困惑:“光速不变”和“原子稳定”.它们直接违反了经典力学的伽利略相对性原理和经典电磁论关于电荷受到加速必辐射电磁波的原理,动摇了经典物理学的基础.其结果,推动物理学向前发展,突破了经典物理的局限,建立了以相对论和量子论为基础的现代物理学.

当前,正处于20世纪和21世纪的交替期,物理学的辉煌成就有目共睹.现代物理基本理论通过原子能、半导体、激光的发现和运用,已经进入了工农业生产和日常生活的各个领域;对物质结构的认识深入到一个新的层次,发现了夸克和胶子;实现了弱和电两种基本相互作用的统一,建立了弱、电、强相互作用的标准模型;……但是,也遇到了两大困惑:“对称性破缺”和“夸克禁闭”.这是严重的挑战,也是难得的机遇.认清这两大困惑,将有助于明确物理学的发展方向.

为了便于说明问题,下面先讲一下物质结构的新层次——夸克、胶子,和相互作用的规范理论——标准模型.

(一) 物质结构的新层次

图1上画出了物质结构的几个层次:原子是一个层次;深入一步就是原子核(和它周围的电子);核又是由核子组成;而现在知道,组成核子(强子)的有夸克和胶子.

人们对物质结构的认识这样一个层次又一个层次地逐步深入,采用的方法大致上可以分为两类:研究整体性质的规律和用炮弹轰击.这可以用原子结构的发现为例来说明.

当初,人们曾经以为原子是“不可分”的粒子.原

子具有内部结构的第一个迹象是通过研究原子的整体性质得到的.门捷列夫将当时已知的原子按照质量和电荷排列,发现了非常好的周期性规律,并据此预言了一些新的原子.如果原子真是不可分的,不同原子的性质之间不会有明显的关系.而现在,原子的整体性质有这样漂亮的周期性规律,只能从原子有内部结构来解释.

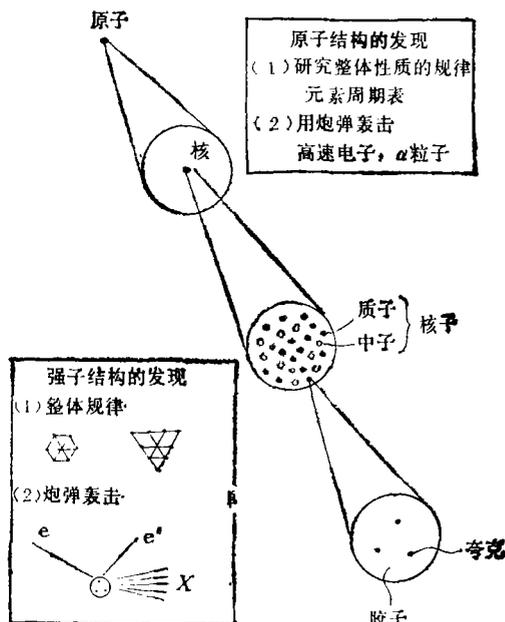


图1 物质结构的几个层次

为了更清楚地了解原子的内部结构,还需要进一步用“炮弹”轰击到原子内部去,直接进行探测.这样的炮弹就是高速电子和 α 粒子.用这种办法,人们发现了原子的有核结构和核周围的电子壳层结构.

这就是对原子结构认识的两部曲——从原子的整

* 将夸克禁闭和对称性破缺作为当前物理学的两大困惑是李政道先生提出的.例如见李著“对称不对称和粒子世界”(中译本),科学出版社1991年版,或北京大学出版社1992年版.

体性质得到周期性规律和用高能电子和 α 粒子作炮弹探测到原子的行星型结构。

本世纪60—70年代,对物质结构的认识从核子—质子、中子深入到夸克、胶子层次也是遵循这一途径。从50年代到60年代陆续发现了一大批参与强作用的粒子—强子。它们和核子—质子、中子属于同一层次的粒子,但是其种类之多,使人们开始怀疑它们是否真的是“基本”粒子。盖尔曼按照强子的整体性质——同位旋和超荷将强子进行分类,提出了“八重法”(参看图1的左下角),并据此预言了一种新的强子,即图1左下角倒三角最下方的 Ω 粒子。强子整体性质存在这样漂亮的规律,说明强子有内部结构。

进一步,要用“炮弹”轰击核子,直接探测其内部结构。为此,用高能电子对核子进行深度非弹性散射。在散射电子的角分布中发现有大量大角度散射电子,证明核子内部存在更为微小的组成粒子。这和卢瑟福用 α 粒子的大角度散射证明原子有一个体积很小的核是同样的道理。

通过这样的两部曲——强子整体性质的八重法和电子对核子的深度非弹,使我们对物质结构的认识深入到了一个新的层次——夸克、胶子层次。

组成强子的粒子称为夸克,传递夸克之间作用力的粒子是胶子。夸克有六类,如表1。每一类又有三种“颜色”——“红”、“黄”、“兰”。总共有18种夸克。每个核子由三个夸克组成,如表2。它们分别有不同的颜色,合在一起,相互抵消,使整个核子不带色。

表1 夸克的种类和性质

	上夸克 (u)	下夸克 (d)	奇异夸克 (s)	粲夸克 (c)	底夸克 (b)	顶夸克 (t)
电 荷 (以电子电 荷为单位)	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
质 量 (MeV)	≈ 10	≈ 5	≈ 100	1500	5000	?

(二) 夸克禁闭

夸克和胶子的存在和性质已经有了充分的实验证据。除了上面谈到的八重法和深度非弹以外,再举一个例子:高能电子-正电子湮灭产生喷注。

当质心系能量高于2GeV的电子和正电子发生对撞时,有大量强子产生。实验发现,这些强子并不是各向同性地飞出来,而是集中在两个相反方向周围的小锥角内,形成一对“喷注”。这类似于救火龙头喷出的水注。我们知道,龙头喷出的水之所以形成喷注,是由于水在离开龙头之前,在水管内有一个确定方向的高速运动,离开龙头后,由于动量守恒,就在这一方向周围的一个小锥角内形成喷注。现在,强子喷注的形成表明,首先产生的是一对沿相反方向高速运动的粒子,

表2 核子的构成

核 子	组 成	电 荷
质 子	uud	$\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$
中 子	udd	$\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$

以后这一对粒子再衰变成强子。这些强子“记得”最初产生的一对粒子的动量方向,从而形成喷注。很自然地假定这一对粒子是一对夸克,见图2。

电子正电子湮灭产生一对夸克和电子正电子湮灭产生一对 μ 子很类似,都是电磁作用的结果,见图2。

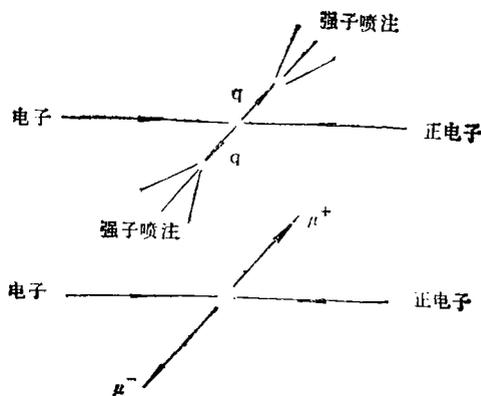


图2 电子对湮灭产生喷注和 μ 子对

它们的作用强度正比于夸克和 μ 子电荷的平方。由于 μ 子电荷等于电子电荷,所以有:

$$R = \frac{e^+e^- \rightarrow \text{强子喷注}}{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-} = \sum Q^2_{\text{夸克}}$$

由表1可见,要产生一对正反夸克($c\bar{c}$)至少需要 $3000\text{MeV} = 3\text{GeV}$ 能量。当能量在2—3GeV之间时,只能产生uds夸克。相应的夸克电荷平方和是

$$\left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{2}{3}$$

但是,实验上发现,在这一能量范围内,比值R等于2。其原因是在以上的计算中忽略了夸克有三种颜色。考虑到夸克有三种颜色,将 $2/3$ 乘上3正好等于2。这是夸克有三种颜色的一个实验证据。当能量进一步升高,超过3~4GeV就可以产生粲夸克对,使R值上升;超过10GeV可以产生底夸克对,使R值进一步上升。这样,R和能量的关系呈现为一个阶梯的形状,实验上的确观察到这种阶梯形状,如图3。

现在,已经有充分的证据证明,在强子(包括核子)的内部存在由夸克、胶子组成的更深入的层次。对此已不容有任何怀疑。但是,迄今为止,在任何实验中都没有直接观察到自由的夸克和胶子。我们知道,用 10^4 电子伏(10keV)的炮弹轰击原子,会把原子打成许多碎

块,这些碎块就是组成原子的电子和核,见图4;用 10^8 电子伏(100MeV)的炮弹轰击原子核,能把原子核打成许多碎块,这些碎块就是组成原子核的强子(核子、反核子、介子);但是,用 10^{14} 电子伏(100TeV)的炮弹轰击强子,虽然也能把强子打成许多碎块,这些碎块却仍然是强子而不是组成强子的夸克和胶子,见图4.这表明夸克和胶子只能存在于强子内部,而不能单独地跑出来.这称为“夸克禁闭”.夸克禁闭是一个实验事实,其原因不清楚,成为当代物理学的一大困惑.

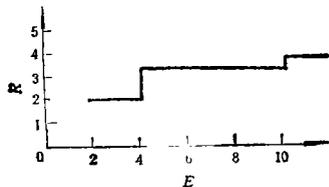


图3 强子/ μ 子比和能量的关系

(三) 相互作用的规范理论 电磁场

现代物理学的又一辉煌成就是建立了相互作用的统一规范理论.我们知道,基本的相互作用有四种,如表3.其中引力相互作用最弱,在讨论物质微观结构时,通常将它忽略不计,只考虑弱、电磁、强三种相互作用.现在,这三种相互作用已经成功地统一到规范理论的框架之中.为了说明现代物理学的这一辉煌成就,我们来对规范理论作一简单介绍.

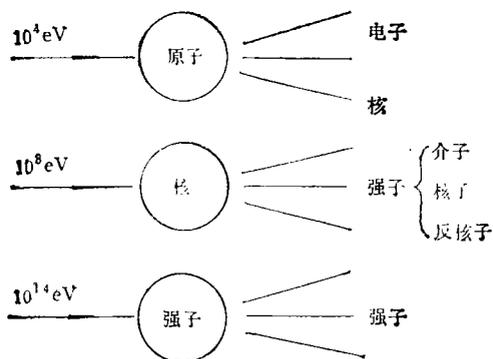


图4 用不同能量的炮弹轰击原子、核和强子

以无自旋粒子的电磁相互作用为例.在量子力学里,无自旋粒子的状态由一个标量函数描述.它是一个复函数,它可以乘上一个任意位相因子而不改变系统的性质.将态函数乘上一个相因子称为规范变换;乘上相因子后不改变系统的性质表明系统有规范不变性.可以证明,规范不变性导致电荷守恒.

以上的论证所根据的是量子力学的基本原理.但是,还应考虑相对论的要求,根据狭义相对论,任何信息的传播速度都不能超过光速.以上,我们进行规范变换是将不同时空点的态函数同乘一个共同的相因子,这称为“整体规范变换”.它意味着有可能瞬时地

将改变相位的命令传给全空间的所有点.显然,这和相对论的要求相矛盾.

为了满足相对论的要求,不同时空点的相位变化应该是不同的.换句话说,态函数上所乘的相因子本身应该是时空坐标的函数.这样的变换称为“定域规范变换”.

问题在于,具有整体规范不变性的系统,在定域规范变换下不再具有不变性.这一点很容易看到.用 $\varphi_i(x)$ 表示描述系统中第*j*种粒子的态函数. x 是时空坐标.整体规范变换是

$$\begin{cases} \varphi_i(x) \rightarrow \varphi_i'(x) = e^{-i\theta Q_j} \varphi_i(x) \\ \varphi_i^*(x) \rightarrow \varphi_i^{*'}(x) = e^{i\theta Q_j} \varphi_i^*(x) \\ \frac{\partial \varphi_i(x)}{\partial x_\mu} \rightarrow \frac{\partial \varphi_i'(x)}{\partial x_\mu} = e^{-i\theta Q_j} \frac{\partial \varphi_i(x)}{\partial x_\mu} \\ \frac{\partial \varphi_i^*(x)}{\partial x_\mu} \rightarrow \frac{\partial \varphi_i^{*'}(x)}{\partial x_\mu} = e^{i\theta Q_j} \frac{\partial \varphi_i^*(x)}{\partial x_\mu} \end{cases} \quad (1)$$

表3 基本相互作用

种类	强度
强相互作用	1
电磁相互作用	10^{-2}
弱相互作用	10^{-12}
引力相互作用	10^{-38}

其中, Q_j 是第*j*种粒子的电荷(以电子电荷为单位).由于一切有物理意义的量都是 $\varphi_i(x)$, $\partial \varphi_i(x)/\partial x_\mu$ 和它们的复共轭 $\varphi_i^*(x)$, $\partial \varphi_i^*(x)/\partial x_\mu$ 的乘积,使指数相因子消去,因而有规范不变性.与此不同,定域规范变换的变换参量 θ 是时空坐标 x 的函数,在对 $\varphi_i(x)$ 求导时,除了对 $\varphi_i(x)$ 求导外,还要对 $\theta(x)$ 求导.即有

而对 $\varphi_i(x)$ 求导外,还要对 $\theta(x)$ 求导.即有

$$\begin{cases} \varphi_i(x) \rightarrow \varphi_i'(x) = e^{-i\theta Q_j} \varphi_i(x) \\ \varphi_i^*(x) \rightarrow \varphi_i^{*'}(x) = e^{i\theta Q_j} \varphi_i^*(x) \\ \frac{\partial \varphi_i(x)}{\partial x_\mu} \rightarrow \frac{\partial \varphi_i'(x)}{\partial x_\mu} = e^{-i\theta Q_j} \frac{\partial \varphi_i(x)}{\partial x_\mu} \\ \quad - i Q_j \frac{\partial \theta}{\partial x_\mu} e^{-i\theta Q_j} \varphi_i(x) \\ \frac{\partial \varphi_i^*(x)}{\partial x_\mu} \rightarrow \frac{\partial \varphi_i^{*'}(x)}{\partial x_\mu} = e^{i\theta Q_j} \frac{\partial \varphi_i^*(x)}{\partial x_\mu} \\ \quad + i Q_j \frac{\partial \theta}{\partial x_\mu} e^{i\theta Q_j} \varphi_i^*(x) \end{cases}$$

显然,在 $\partial \varphi_i(x)/\partial x_\mu$ 和 $\partial \varphi_i^{*'}(x)/\partial x_\mu$ 中,多出了对 θ 求导的项,在相乘时无法消去.系统不再具有不变性.

然而,规范不变性和电荷守恒相联系,必须继续保持.为此,引入一个附加的场 $A_\mu(x)$,称为规范场,并将所有的时空导数 $\partial/\partial x_\mu$ 改为“协变导数” D_μ .它的定义是

$$D_\mu \equiv \frac{\partial}{\partial x_\mu} - i e Q_j A_\mu(x) \quad (2)$$

在定域规范变换下,它变为

$$\begin{aligned}
D_{\mu j} \varphi_j \rightarrow D'_{\mu j} \varphi'_j &= e^{-i\theta Q_j} \frac{\partial \varphi_j(\mathbf{x})}{\partial x_\mu} \\
&- iQ_j \frac{\partial \theta}{\partial x_\mu} e^{-i\theta Q_j} \varphi_j(\mathbf{x}) \\
&- ieQ_j A'_\mu(\mathbf{x}) e^{-i\theta Q_j} \varphi_j(\mathbf{x}) \\
&= e^{-i\theta Q_j} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_\mu} \right. \\
&\left. - ieQ_j \left(A'_\mu(\mathbf{x}) + \frac{1}{c} \frac{\partial \theta}{\partial x_\mu} \right) \right\} \varphi_j(\mathbf{x})
\end{aligned}$$

和协变导数的定义(2)式比较可见,只要上式右方括号中的表达式等于 $A_\mu(\mathbf{x})$ 就能使 $D_{\mu j} \varphi_j$ 的变换只是简单地乘上一个指数因子,从而在和复共轭相乘后不变.因此,定义定域规范变换为

$$\begin{cases} \varphi_j(\mathbf{x}) \rightarrow \varphi'_j(\mathbf{x}) = e^{-i\theta(\mathbf{x})Q_j} \varphi_j(\mathbf{x}) \\ A_\mu(\mathbf{x}) \rightarrow A'_\mu(\mathbf{x}) = A_\mu(\mathbf{x}) - \frac{1}{c} \frac{\partial \theta(\mathbf{x})}{\partial x_\mu} \end{cases} \quad (3)$$

原来具有整体规范不变性的系统,经过代换

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial x_\mu} \varphi_j(\mathbf{x}) &\rightarrow D_{\mu j} \varphi_j(\mathbf{x}) \\
&\equiv \left(\frac{\partial}{\partial x_\mu} - ieQ_j A_\mu(\mathbf{x}) \right) \varphi_j(\mathbf{x}) \quad (4)
\end{aligned}$$

以后,在定域规范变换(3)下继续保持不变.如果讨论的是带电粒子系统,相应的规范场 $A_\mu(\mathbf{x})$ 就是电磁场.我们看到,对带电粒子系统加上定域规范不变的要求,自动地引入了电磁场,并且完全决定了带电粒子和电磁场相互作用的形式.它通过代换(4)得到,即所谓的“最小相互作用”.

(四) 相互作用的规范理论 杨米尔斯场

以上讨论电磁相互作用的定域规范理论不是按照历史的顺序.历史上,在电磁相互作用的麦克斯韦理论建立的时候,并不知道这是一种定域规范理论.只是在1954年,杨振宁和米尔斯才提出定域规范理论并将它应用到强相互作用.

我们知道,从强相互作用的角度看来,质子 p 和中子 n 没有分别.可以将它们看成同一粒子(核子 N) 的两种不同状态

$$N = \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}.$$

这是一个二维矩阵.相应地,规范变换不是一个简单的指数因子,而是作用在这个二维矩阵上的 2×2 方阵:

$$U = e^{-i\boldsymbol{\theta} \cdot \boldsymbol{\tau} / 2},$$

其中, $\boldsymbol{\tau}$ 是泡里矩阵; $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 是写成矢量形式的三个变换参数,对于定域规范变换,是三个函数 $(\theta_1(\mathbf{x}), \theta_2(\mathbf{x}), \theta_3(\mathbf{x}))$.在此情况下,为了保持定域规范不变,需要引入三个规范场

$$W_\mu(\mathbf{x}) = (W_\mu^{(1)}(\mathbf{x}), W_\mu^{(2)}(\mathbf{x}), W_\mu^{(3)}(\mathbf{x}))$$

这一理论在数学形式上非常漂亮,但是它有一个

很严格的要求,即:为了保证定域规范不变,规范场的质量必须为零.然而,实验上除了光子以外,没有发现其它质量为零的矢量粒子.因此,杨米尔斯理论在提出的最初二十年内并未受到很大重视.只是在1964年希格斯提出定域规范对称性的自发破缺机制以后,杨米尔斯理论才得到广泛应用,成为各种相互作用的统一理论基础.

(五) 对称性自发破缺 希格斯机制

我们的希望是,理论框架是定域规范不变的,而实际实现的状态却破坏了这一不变性,使得规范粒子有不为零的质量.表面上看来,这似乎是自相矛盾,其实,完全有可能.在物理学中有很多这样的例子,最熟知的是铁磁性.

我们知道,对于铁磁物质有一个临界温度 T_c ,称为居里点.在温度 T_c 以下,显示出有铁磁性;而当温度高于 T_c 时,铁磁性消失,成为顺磁体.这种物质有分子磁矩.这些分子磁矩原本是混乱无序,没有一个优选方向,因而,系统对于空间转动有不变性.但当温度低于 T_c 时,分子磁矩之间的相互作用使它们相互平行的倾向超过了热运动的混乱倾向,从而发生自发磁化,破坏了转动对称性,如图5.这就是系统本身具有对称性,而实现的状态破坏了对称性,即“对称性自发破缺”,的一个例子.

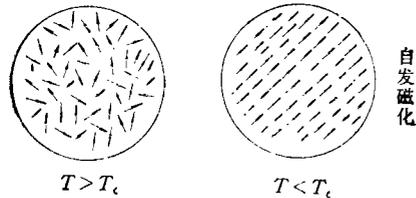


图5 铁磁体的对称性自发破缺

实现定域规范对称性自发破缺的机制称为希格斯机制.温伯格和萨拉姆应用这一机制提出了弱电统一理论的标准模型.这一模型将轻子(电子、 μ 子、 τ 子)和夸克参予的弱作用和电磁作用统一到一个定域规范对称群 $SU(2) \times U(1)$ 中.相应的规范场有四个: A 、 W^+ 、 W^- 、 Z^0 .其中, A 是电磁场,没有质量. W^+ 、 W^- 和 Z^0 称为中间矢量粒子,它们由对称性自发破缺而获得质量.1983年在西欧中心 CERN 的质子反质子对撞机 SPS 上成功地发现了 W^+ 、 W^- 和 Z^0 ,使得弱电统一的标准模型得以确立.在那以后,这一模型经受住了实验的多方检验.迄今为止,没有发现违反它的情况.

标准模型的成功的确是当代物理学的一个辉煌成就.然而,它也向人们提出了一个问题:为什么有对称性自发破缺?对称性自发破缺的实质是什么?这是当代物理学的又一困惑.

1993 年学术论文增刊目录

吴水清、赵国求: 现代物理学与应用技术关系初论
程鹏寰: 英文写作的简洁性
许国发: 核-核碰撞中产生的快粒子研究
刘福虎、李晓琳: 高能重核与核乳胶电磁作用的直接电子对产生截面
怀英: 《现代物理知识》杂志是怎样为物理教学服务的
李云祖: SEM 测试原理及误差分析
吴水清、陈志中: 物理教学与经济发展关系初论
魏安赐: 核裂变均匀性反应堆临界体积
魏安赐: 宇称守恒定律
张晓春、赵志洲: 物理学与计算科学
贾祥富: 投影算符的微扰形式
林秀华: 谈物理人才培养
刘南生: 印制电路板焊点缺陷检测新方法
张永照、王浚忠: 感应电动势计算中易出现的一个问题及其两种计算方法等效的证明
丛选忠: 大学物理教学改革之我见
赵国求: 电子波及其几率解释
柳涛: 漫谈“神经网络”和神经计算机

李增为: 管窥蠡测反物质
高君芳、刘直承: 从科技成果转化生产力的观点探讨普物教改
姚庚新: 中学物理教学应渗透现代物理知识
姚庚新: 农村中学物理教学如何为乡镇经济建设服务
赵宗贤: 我如是讲“痛”
郭余峰、刘业厚: 用伽马射线测定管道中原油密度和含水率
魏安赐: 宇称
范衍道: 电力类物理教学中的五个结合与五种意识
刘藻: 日本的基础物理教学
毛旭峰: 柱形反射面上的超声迟到信号
李维民、黄海清: 复摆的新用途
黄海清、李维民: 从海湾战争看近代物理的发展与应用
林秀华: 迅速崛起的激光技术
于天赐: 激光在医学上的应用
王荣泽: 让高校物理教学更好地为经济建设服务
胡铁军: 浅谈物理教学改革

(秋慧)

(六) 困惑与方向

为了揭开对称性自发破缺和夸克禁闭这两大困惑的奥秘,人们正在进行艰苦的努力。

对称性自发破缺的希格斯机制要求存在一种无自旋粒子——希格斯粒子 H 。人们正在努力寻找它。为此,已经建造了一些大型粒子加速器,最近的例子如西欧中心 CERN 的大型电子对撞机 LEP,但始终未能找到。其原因,可能是因为希格斯粒子质量太大,现有加速器和对撞机的能量不够高,无法产生它。目前,还在准备建造能量更高的加速器,如美国的超级超导对撞机 SSC 和西欧中心 CERN 的大型强子对撞机 LHC。无论是在这些对撞机上成功地发现了希格斯粒子,或证明它根本不存在,都会加深对于对称性自发破缺实质的认识,明确进一步努力的方向。

人们也在进行巨大的努力,设法在实验室里创造条件,使夸克禁闭和对称性自发破缺消失——夸克禁闭解除,破缺对称性恢复。采用的办法是让两个重核(重离子)以极高的速度相互对撞,使得温度升高到亿亿度以上。预期在这样高的温度下,夸克禁闭将会解除,强作用的手征对称性自发破缺能得到恢复*,如图 6。目前,西欧中心 CERN 的 SPS 和美国布鲁克海沃国

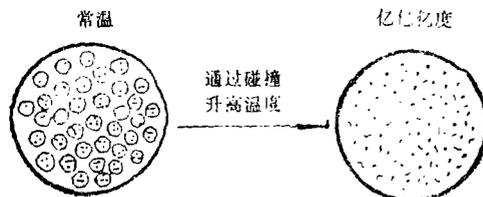


图 6 高温下夸克禁闭的解除

立实验室的 AGS 都进行了高能重离子碰撞实验,积累了丰富的经验。美国布鲁克海沃国立实验室正在筹建相对论性重离子对撞机 RHIC,西欧中心 CERN 也计划在筹建的大型强子对撞机 LHC 上进行重离子对撞实验。预计,这两个超高能重离子对撞实验将分别在本世纪末和下世纪初建成,投入运行。

展望未来,下一世纪人们将能解除夸克禁闭,恢复自发破缺的对称性,从而揭开这两大困惑的奥秘。它有可能使现有的物理理论得到进一步的完善和发展,也有可能证明现有物理理论存在根本性困难,从而孕育出新世纪的新物理。

* 要恢复弱作用的破缺对称性需要更高的温度。