

# 核物理学的研究前沿与

## 九十年代的展望\*

曹文强 王顺金 吴国华

(兰州大学现代物理系) (中国科学院近代物理研究所)

摘要: 本文根据《九十年代的物理学》(美国, 1986年版)一书的内容, 结合我们的看法, 对核物理学的研究前沿与九十年代的可能进展, 进行了简要介绍和讨论。

### 一、探索夸克-胶子等离子体

按照大爆炸宇宙论, 宇宙产生于 200 亿年以前的一次大爆炸。在此瞬间, 所有物质温度  $T \approx 10^{16} \text{GeV} (10^{32} \text{K})$ 。在这远小于 1s ( $t = 10^{-44} \text{---} 10^{-36} \text{s}$ ) 内, 四种力强度相近, 只存在轻子、夸克、胶子、光子和中间玻色子, 不存在介子和重子, 同时宇宙开始膨胀而冷却。当  $t \approx 10^{-10} \text{s}$  时,  $T = 10^3 \text{GeV} (10^{16} \text{K})$ , 弱作用强度开始小于电磁作用强度, 夸克仍然是自由的。当  $t \approx 10^{-6} \text{s}$  时,  $T = 100 \text{---} 200 \text{MeV} (1 \text{---} 2 \times 10^{12} \text{K})$ ,  $q$  和  $\bar{q}$  开始结合成强作用粒子(介子、重子)。大爆炸后 3 分钟, 宇宙继续膨胀、冷却, 核子开始结合成轻核, 星体、银河开始形成。现在, 宇宙背景温度  $T = 3 \text{K}$ 。

用相对论性重离子碰撞产生宇宙早期几秒钟以内的条件, 产生夸克不禁闭的条件(存在于中子星核心), 既有宇宙学意义, 又可检验 QCD 理论的基本概念。这种物质称为夸克-胶子等离子体。夸克不仅禁闭于强子内部, 而且存在于大块核物质内部, 涉及 QCD 的大范围行为。

#### 1. 核物质状态

给物质注入能量, 将产生物质的高能状态, 引起结构发生相应的变化——相变。例如

加热: 冰  $\rightarrow$  水  $\rightarrow$  汽;  $E$  增加,  $E_{*}^{\text{冰}} < E_{*}^{\text{水}} < E_{*}^{\text{汽}}$ ;  
 结构变化, 固态  $\xrightarrow{\text{相变}}$  液态  $\xrightarrow{\text{相变}}$  汽态。

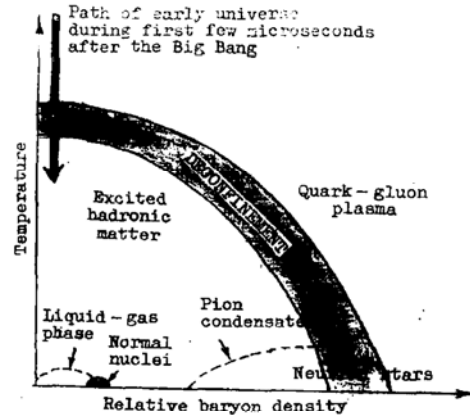


图1 核物质相变

同样, 加热核物质, 也可使其发生相变: 核物质  $\rightarrow$  夸克-胶子等离子体。核物质的可能状态是正常核态、强子物质态和夸克物质态。

组成日常世界的核物质 ( $\rho = \rho_{\text{normal}}, T \sim 0$ ), 在获得能量后, 单个核子有趋于分开的倾向, 从而温度稍增高, 密度下降, 而发生液汽相变 ( $T > 0, \rho < \rho_{\text{normal}}$ )。用 100 MeV/u 重离子碰撞或质子-核碰撞产生的热斑, 可以探测到这种相变。目前已有这种证据。用凝聚理论的参数化方法 (Phys. Rev. Lett., 52 (84) 496), 给出其指数律  $P(A) \sim A^{-K} X A^{2/3} Y A^4$ , 定出  $K = 1.7 \text{---} 1.8, T_c = 12 + 0.2 \text{MeV}$ 。

\* 国家自然科学基金与教委博士点基金资助的课题。

在  $T$  小 ( $\rho > \rho_{\text{normal}}$ ) 的情况下,核物质可能发生  $\pi$  凝聚相变。这是核物质具有较高秩序的一种状态,类似于晶体点阵中的原子。目前尚无证据,可能在中子星内部存在。对 中子星,  $T \sim 0, \rho > \rho_{\text{normal}}$ 。

在核介质内,  $T = 20 - 100 \text{ MeV}$  时,单个核子将产生许多新的激发能级。此时的核物质称为激发的强子物质。

当核物质的温度或密度足够高时,夸克将解除禁闭,跑出核子、强子的范围外,形成夸克-胶子等离子体(QGP)。

## 2. 夸克禁闭解除

用相对论性重离子束来产生 QGP,这是因为越重、能量越高,越容易产生 QGP 所需的高温、高密度区域。如 U 就是较理想的炮弹。

(1) QGP 的描述 描述 QGP 主要是给出其参量变化和临界值(温度  $T_c$ , 密度  $\rho_c$ , 能量密度  $e_c$ )。目前的理论计算方法是点阵规范理论。该理论基于四维时空上的规则点阵概念,用点和点间的连线来定义系统的物理性质。它运用群论的概念和复杂的数值计算方法,根据点阵间距计算物理性质相应的值。依据该理论,人们对 QGP 的产生做了一些粗略的估算。

一种简单的估算是基于高温下,把核子挤压得很紧来产生 QGP,结果是  $\rho_c \sim$  几倍  $\rho_{\text{normal}}$ , 而核物质正常密度  $\rho_{\text{normal}} \sim 0.16/\text{fm}^3$  其它的估算考虑到核子的有效尺度,认为可能尚未达到  $\rho_c$ ,核物质的性质就发生了重大变化。

另一种近似是考虑核子间的空间用产生的介子( $\pi, k, \rho, p - \bar{p}, \dots$ )来填充,从而增加密度,实现夸克禁闭解除。估算结果是

$$e_c \sim n \text{ 倍 } e_{\text{normal}} \quad (e_{\text{nor}} = 0.15 \text{ GeV}/\text{fm}^3)$$

复杂的理论计算支持了这些估算,给出产生 QGP 的条件是  $T = 140 - 200 \text{ MeV}$ ,  $e_c > 0.5 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ ,但现在的重离子加速器尚达

不到(最近,实验条件已接近或达到上述条件)。

(2) 实验证据 目前,至少有两个实验证据支持有可能达到夸克禁闭解除。一个是相对论性宇宙射线与乳胶中 Ag 和 Br 碰撞测得一个事件(Japanes-American Cooperative Emulsion Experiment):  $\text{Si} (400 - 5000 \text{ GeV}/u) + \text{Ag} \rightarrow 1000 \text{ 个粒子 (多数为 } \pi)$ 。碰撞能量密度  $e_c \sim 3 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ 。尚需用加速器产生足够多的类似事件,才能得到有意义的结论。另一个证据是轻子-核的深度非弹实验(Europen Muon Collaboration/Stanford Linear Accelerator Center),探测核内核子的夸克结构。夸克在核内核子中比在自由核子中运动更自由一些(范围大一些)。果真如此的话,那么夸克禁闭解除所需的  $T_c, e_c$  可能比目前所估计的要小一些。

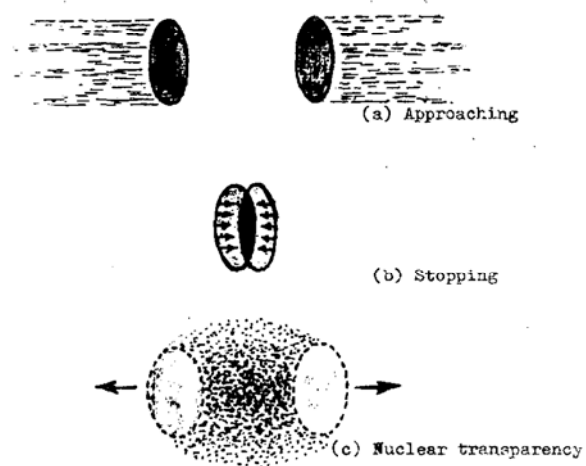


图2 QGP 产生的两种情况

(3) 重离子束能量产生 QGP 所需离子束能量  $E_i$  依赖于如图 2 的两种不同的碰撞情况: ① 达到最大的  $\rho_c$ , 要求强阻止,  $E_i \sim 10 \text{ GeV}/u$ ; ② 达到最大的  $e_c$ , 要求能量高,  $E_i \sim 30 \text{ GeV}/u$ 。

## 3. 探测 QGP

(1) QGP 的演化过程 从 QGP 形成到再复合所需时间约为  $10^{-22} \text{ s}$ , 约等于光穿过核的时间。相应的演化和观察为:

QGP 膨胀  $\implies$  冷却  $\implies$  凝聚成强子相。  
└─发射粒子─┬─可观察─┘

(2) 探测 QGP 的信息 通常可分为两类: ① 早期(形成)信息, 能保留的是轻子、光子(不参加强作用, 与环境作用较弱); ② 中期(复合)信息。再复合、凝聚时, 发出的信息能表征 QGP 的奇异粒子数、反重子数、粒子数反常涨落、夸克的反常组合(反常粒子)或自由夸克(?)。

(3) 对探测器的要求 探测 QGP, 要求仪器在处理极大能量, 极多粒子数、极多粒子种类和极多信息分析等方面, 有极大的容量。例如  $U(30\text{GeV}/u) + U(30\text{GeV}) \rightarrow 10$  万个静止  $\pi$  或几千个能量为  $200\text{MeV}$  的  $\pi$ 。其容量是很大的。因此需要将多种探测技术和仪器组合使用。例如使用探测器的陈列技术; 用热量计(Calorimetry)技术测总能流(非粒子流); 各种色盲探测器(如轻子探测器), 因只认识一定种类的粒子, 把粒子数减少到可以处理的水平等。

#### 4. 相对论性重离子物理学

用相对论性重离子物理学研究 QGP 时, 还会有副产品, 形成其它重要课题。例如:

(1) 高激发强子物质 在很高能量下的质子-核、核-核碰撞中, 核物质温度足够高时, 可生成大量重子共振态。其中主要是核子共振态  $N^*$  及  $\Delta$  共振态。(电荷  $Q = -1, 0, +1, +2$ )。因它们是通常核物质与 QGP 间的过渡相, 其研究是很有意义的。可以形成一些类似于普通核的外来核物质的亚稳态, 例如类似于  $^{16}\text{O}$  的  $\Delta^{16}$  态。  $N^*$  或  $\Delta$  物质退激时, 会突然发射许多  $\pi$  而形成  $\pi$  激光。许多关于激发强子物质的想法支持了一些富有成果的实验。

近年来, 在几百  $\text{MeV}/u$  重离子碰撞实验中, 观察到较期望值少的  $\pi$  产生。一种解释认为是压缩效应, 即大量动能主要用于压缩而不是产生  $\pi$ 。这在高能下是否继续存在? 解释是否正确? 对这种问题以及激发的强子物质的其它问题的研究, 不仅要求加速器提

供全部的核束而且核束的能量要可调, 以便观察一个给定的物理过程是如何随能量变化的。这将为扩展核物质理论提供实验基础。

(2) 固定靶实验 用固定靶产生强准直的粒子束, 可进一步做许多核物理实验。例如, 用周边碰撞产生非常丰中子(或丰质子)的远离  $\beta$  稳定线的核素。用这类反应已发现 20 多个新的核素, 从而拓展了放射性核系列, 目前人们对这类核素的特性(能量和寿命)兴趣浓厚。理所当然, 选用这些核素作为弹束, 就可研究由宇宙线传播和辐射所形成元素丰度的那些重要过程的核反应机制。同时, 在放射生物学和核医学方面也具有很大的实用价值。固定靶实验也可用来产生高能电离离子, 例如  $^{238}\text{U}^{91+}$ , 通过其衰变来检验 QED。

## 二、对核物质描述的改变

研究 QGP 对于认识四种自然力和宇宙早期阶段有着基本的意义。所研究的是极端条件下核物质的性质。对非极端条件下核物质性质的认识仍很不够, 改进描述核物质的理论是十分重要的。核的基本构件是夸克和胶子。然而, 用夸克和胶子来描述核物质的问题迄今仍是难以处理的, 因为 QCD 尚不能解决夸克在核子半径尺度的作用力问题。在中等距离上, 夸克作用力问题是十分复杂的。

短程夸克-胶子区域对核物质性质的影响如何? 核子之间的相互作用和其内部结构是否相互影响? 能否建立量子强子动力学(QHD)去描述核多体系中的介子交换过程? 从 QND(量子核子动力学)过渡到 QHD 将是必要的。

4GeV 的 CEBAF(连续电子束加速器装置)所产生的高能电子可与各种等级的粒子作用, 可提取核子、介子、夸克等粒子在核物质中作用的信息。几个 GeV 的质子, 可用来探测核子-核子作用短距离的行为。强流中能介子束可用来产生核中不寻常重子。低

能  $p-\bar{p}$  碰撞,可研究在强作用影响下粒子湮灭的短距离现象。

理论进展的目标在于给出核物质从强子到夸克-胶子的各种描述;了解核物质的各种性质;在激发能、角动量和  $N/Z$  变化的极端条件下,核物质性质如何变化等。因此,还需要将现有核反应研究推到这些不寻常条件下。

### 1. 核中的夸克

夸克间通过交换胶子而相互作用,产生介子、重子和原子核。我们只知道小距离的渐近自由和长程禁闭,在核内的作用却知之甚少。

(1)由实验获取的夸克知识 核中夸克的知识主要来自光子、电子和  $\mu^-$  介子所作的实验。Stanford、EMC、欧洲和日本等地的实验室,用电子与精确强粒子束的散射实验,显示了许多核的夸克结构性质。十多年前,Stanford 发现质子由三个分数电荷夸克组成,且靠紧时作用减弱。后来其它实验室的工作表明, $^3\text{He}$  结构反常,出现物质分布的中心下陷。这些类似的问题,只有介子和夸克在核中的作用同时被考虑和描述后,才可能得到解释。

(2)多夸克大袋子 若几个核子有足够时间靠在一起,就可能形成 6 个或更多夸克构成的大袋子。这种核的性质要求对夸克-胶子在核中的作用做出明显的处理来解释。这就要求系统地研究核子的对关联效应,需要做高能电子敲出核子对的复合测量实验,以了解短程核子的对关联行为。CEBAF 适合于做这样的理想实验。

(3)宇称微小不守恒 在  $p-p$  散射中,宇称并不严格守恒。这种宇称微小不守恒来自核子间极短程弱作用。为定量了解宇称破坏的程度,需了解短程强作用和极短程弱作用之间的相干。实验给出,宇称破坏在质子能量  $5\text{GeV}$  时较  $50\text{MeV}$  时大 10 倍。中能区理论和实验研究将可以严格地检验基于 QCD 的一些模型。其实验需要高品质和强束流的

极化质子束(几个 GeV 能区)。

(4)双重子共振态 能量  $>1\text{GeV}$  的核子-核子散射实验将产生 6 夸克袋或双重子共振态。共振散射几率或共振对两核子自旋取向的依赖性随  $E$  出现尖锐的变化。

CERN 的实验设备 LEAR(Low-Energy Antiproton Ring),将提供 6 夸克物理的进一步研究; $P-\bar{P}$  碰撞将提供研究  $q-\bar{q}$  相互作用的机会;  $p-\bar{p}$ “原子”存在的几率很小,对它的研究将开辟新的研究领域检验 QED。

强流  $K$  束对研究双重子态很有用,因为它允许体系形成一个甚至二个奇异夸克。强子袋模型最令人激动的预言之一是存在一个稳定的、双奇异、双重子态,它被称为  $H$  粒子(能量  $E \approx 2.15\text{GeV}$ )。实验是困难的,因涉及两步过程:形成极短寿命的超子;超子与靶中核子互作用产生次级粒子。也预言了许多其它奇异双重子,观测它们对肯定夸克模型的动力学是十分重要的。

(5)其它现象 核作为夸克-胶子量子多体系统,会出现许多与多体系统有关的新现象。即使组成与力弄清楚了,作为多体系统仍有未预言的现象出现,如超寻,就没被 QED 对电磁力理解的理论所预言。

### 2. 核中的介子和重子共振态

介子传递核力,故核必包括介子自由度。用极短波长粒子束才能看到介子。

在  $\gamma$  光核反应中,考虑存在介质自由度才能解释  $\gamma-d$  近阈反应的数据。在高能电子实验中,需引进介子交换产生的电流生的电和磁场分布才能解释轻核数据。CEBAF 将扩展这方面的知识。

用  $e, p, \pi$  为探针,可探测核子稀有组态:核子对组态、多核子集团和极快核子。这有助于弄清短程核力、核子集团效应、核分子态和产生外来核等。

在核内渗杂粒子,研究对核性质的影响。例如用  $\pi, k$  产生重子共振态:  $\pi + N \rightarrow N^*$  或  $\Delta, k + N \rightarrow Y^*$ 。寿命  $\tau$  虽很短,但却长到足以探测到核介质和重子共振态的

变化。

在适当条件下,  $\kappa^- + \text{核} \rightarrow \Lambda$  超核。此时,  $\Lambda$  和核的性质都改变了。由此可了解相互作用细节, 还可产生其它外来核, 如双超子核。

### 3. 极端条件下的核性质

在参量  $E^*$ 、 $J$ 、 $N/Z$  等处于极端条件下, 对核能级性质的研究, 可以检验和扩展现有核多体理论, 检验和修改现有的模型理论, 并开拓了研究原子核的次核子结构的新时期。某些极端条件可在核的超声波(核中声速  $= 10^5 \times$  声速) 碰撞时获得。正如超越声障后会产生许多奇特现象一样。幸喜现有加速器已可提供此类碰撞的核束, 以研究核震波、核压缩, 碎裂和核性质巨大变化(从低能时许多核子共同的类流体行为到高能时的单个核子—核子相继碰撞。)

Michigan, Chalk River, Ganil, Japan Tokyo, Lanzhou 等地新的中能重离子加速器, 可提供所需的束流。必须设计和制造可探测和分析碰撞碎片中的上百个粒子的复杂仪器, 还需要发展适合中能区的理论概念与计算方法, 才能处理实验数据, 在十分低能区和十分高能区所用的简化假设在中能区并不成立。多核子转移反应产生的极丰中子或极丰质子核已处于(或接近)中子或质子下滴线, 是极不稳定的, 有可能揭示出新的衰变模式。

用短寿命次级核作炮弹, 可产生天体物理学中的反应。例如超新星爆炸时中子的迅速俘获, 白矮星表面和增生中子星中质子的快速俘获等, 这将可能开创全新的核谱学领域。

## 三、检验弱电统一和大统一理论

科学上的统一原理是指分离的知识在深层次上的统一。例如, 牛顿万有引力定律把天上、地上的引力现象统一; 麦克斯威尔方程把电与磁、电磁波与光统一; 爱因斯坦相对论把时空和质能概念的统一。本世纪 30 年

代中期, 人们认为存在四种基本力: 引力、电磁力、强力和弱力。1967 年, 温伯格、赛拉姆及格拉肖实现了弱电统一。

科学知识统一和综合的价值在于揭示出自然界固有的简单性本质, 以改变人们的世界观, 增加理论的逻辑预言能力。例如: 麦克斯威尔统一方程就预言了电磁波; 弱电统一预言了力的传递者为中间玻色子  $W^+$ 、 $Z^0$ ; 还预言核过程中  $K^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ , 这是 s、d 夸克所具有的奇异效应的结果。1983 年, 这三种粒子在 CERN 被发现。这些问题的考虑导致新型 Charm 夸克的假设。

### 1. 标准模型

弱电统一模型与 QCD 的结合, 称之为标准模型。它可以重整化, 与核及粒子物理实验一致。但它仍不完全, 主要表现在: (1) 不包括引力; (2) 不能说明为什么有三族轻子; (3) 不能说明某些重要的守恒定律及其破坏的本质。例如, 宇称破坏是弱力的主要特性, 但进入理论是任意的; T(时间反演不变性) 破坏进入理论有几种方式, 不知那种正确; 轻子族数目是否守恒不清。我们尚不知一些对称性原理的确还起作用, 还是现有实验还不够灵敏以测出其可能的破坏。

### 2. 中微子束物理学

研究弱相互作用, 可检验弱电统一理论。按照该理论,  $\gamma_e + e$  散射可以是两种方式:

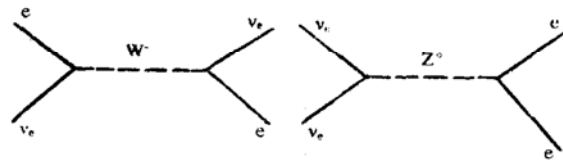


图 3

即通过交换  $W^-$  玻色子,  $e$  与  $\gamma_e$  相互转化; 或通过交换  $Z^0$  玻色子,  $e$ 、 $\gamma_e$  保留其原来的样子。这两个过程是相干的, 事件的总几率不是这两个单独几率的简单求和。证明这种相干性和测量它的符号将是弱电理论的关键性检验。下一代加速器可能提供更强、更高能的中微子束, 它们与核散射后可能使核处于

激发态。因为核态有具体的量子数,所以中微子与核散射这类实验可把弱电理论分解成几部份,每部份相应於不同的量子数。可对弱电理论做出比目前更细致的评价。

### 3. 检验大统一理论

目前的大统一理论(QUT)很多,在较低能量时都可退化为弱电统一理论和 QCD,其差别在  $10^{15}$  GeV 能量时才显现。目前实验条件不可能达到,甚至也超过宇宙线的能量。那么,如何才能达到这一惊人的能量,以便人们可从各种各样的理论中识别出正确的大统一理论? 基于海森堡的测不准原理,任何能量的一个粒子可以作为虚粒子从真空中出来,只要它在一定的时间内回归真空,也就是说它的寿命在规定的极限内。能量越高,允许的寿命越短。这样,我们就得到了用任何其它办法无法获得的超高能虚粒子,研究其相互作用。一个  $10^{15}$  GeV 的虚粒子具有惊人的特性:自由质量为  $10^{-9}$  g;寿命  $10^{-39}$  s,以光速也只好穿过核子直径的  $1/10^{16}$ 。研究虚粒子相互作用的实验是十分精细的,基于强力弱力统一的实验已在设计,有些实验将在下面介绍,有些正等待新的加速器。

(1) 时间反演不变的破坏  $T$  破坏原因尚不清楚。现已知的唯一例证是  $k^0$  衰变。 $k^0$  和  $\bar{k}^0$  仅奇异量子数(与强作用有关)不同。弱作用与奇异数无关,把纯  $k^0$  与纯  $\bar{k}^0$  混合了起来。实验观测的  $k^0$  与  $\bar{k}^0$  是纯  $k$  态的两种不同的混合态。

现有的 GUT,基于  $k^0$  衰变细节,可将  $T$  破坏纳入。这需要  $k^0$  衰变更精确的实验和别的反映  $T$  破坏的实验去检验 GUT。这些实验要求把  $k$  束流强度提高 10—100 倍。

(2) 中子的电偶极矩 只有  $P$ (宇称)和  $T$  两者破坏,中性粒子才有电偶极矩。因此,若能证实中子有电偶极矩,就表明  $T$  破坏。找到  $T$  破坏的第二个例子是物理学的大事。

把中子放进强磁场。由于中子内禀磁矩与外磁场作用产生两个能级。用射频(约 60 MHz)可使中子磁矩取向改变。同时加上强

电场后,如果中子有电偶极矩,能级就会发生微小变化。目前实验精度已可测出射频改变 0.001 Hz 引起的变化。目前实验上未发现中子有电偶极矩。若有电偶极矩,则它  $< e r_0$ , 而正负电子间距  $r_0 = 6 \times 10^{-25}$  cm (约中子线度的  $10^{-11}$  倍)。这一实验排除了一些 GUT。正确的 GUT 应给出中子电偶极矩  $d < e \times 6 \times 10^{-25}$  cm,  $T$  破坏只发生在  $k^0$  系统中。进一步的实验是用冷中子来增加实验的精度。

(3)  $\mu$  衰变和  $k$  衰变 按照夸克模型,6 个夸克分为三代:  $u, d; s, c; t, b$ 。许多年前,人们就知道弱作用把不同代混合起来。因此可存在稀有衰变:  $\Lambda(uds) \rightarrow p(uud) + e + \bar{\nu}_e$ 。

轻子也分三代:  $e, \nu_e; \mu, \nu_\mu; \tau, \nu_\tau$ 。许多 GUT 允许混合轻子代,预言了新的衰变模式,给出轻子代数不守恒。例如  $\mu \rightarrow e + \nu$ 。三个介子工厂(Los Alamos, British Columbia, Swiss Villigen)正在做该实验。目前,Los Alamos 的实验确定它出现的几率下限为  $1/6 \times 10^9$ 。若用更强  $\mu$  介子束,可望达到  $1/10^{15}$  精度(大于实验灵敏度)。如果在此情况下仍看不到此类衰变,则可排除许多 GUT。

目前,理论预言:  $k^+ \rightarrow \pi^+ + \nu + \bar{\nu}$ , 其几率为  $(1-30)/10^{10}$ 。这是实验可达到的精度。若实验证实上述衰变,则可肯定夸克代数目,  $t$ (top)夸克的存在及其质量。

弱电理论和强作用理论的结合可以解释大部分核性质。不能解释和尚不知道的性质,或许要从 GUT 来理解。但目前加速器尚达不到  $10^{15}$  GeV 能量,故不能直接检验 GUT。目前应在可能达到的高能量范围内,提高流强,增强实验选择性和敏感性,通过稀有过程的研究来检验 GUT。

## 四、一些初步看法

核物理目前的基本状况是,一方面传统核物理的研究在继续发展,另一方面又冲破



传统的领域,与粒子物理、天体物理等交叉结合,拓展了新的领域。这两方面的扩展,要求核物理相应的理论方法和实验技术也随之扩展和改进。

在传统核物理的研究领域,人们采用的理论方法是非相对论量子核子多体理论(QND),其研究对象是自然核素在低能和通常条件下的(结构与反应)性质。

一种观点认为,低能传统核物理在某些研究领域已相对贫困化,这一观点对吗?

任何科学研究领域和矿山一样,有一个随挖掘而相对贫困化的过程,除非矿藏储量是无穷或挖掘进度无穷缓慢。无限多体系统是一个近乎无限储量的富矿,类似超导、高温超导等等,它的运动模式可以层出不穷。但我们必须认识到,科学研究与科学研究领域,开矿与矿山的不同。基于这样的认识,事实也同样证实,传统核物理还有大量的工作可做,传统核物理本身的发展正在加速进行。在实验方面,主要表现为新的物理思想,巧妙的构思和更精确、更丰富的实验数据的积累。见于结构,是更多激发模式和更精细结构的发现;见于衰变,是新的衰变模式的观测;见于反应,是新的反应机制的发现和新的自由度的提取等。在理论上,其发展表现为现有理论局限性的某些克服和企图以统一的理论方式解释实验数据。例如自洽场理论,考虑了相对论、温度自洽场、多体关联和 $\pi$ 、 $\Delta$ 自由度的修正。推转壳模型考虑对力、四极力以至高极力(高阶形变)。动力学群理论在结构和反应两方面都在发展。核反应统一理论,如复合核理论和中间过程理论等,也在发展。总之,随新的运动模式、衰变模式和反应机制的发现和反应,人们正力图以一种统一的方式来描述结构与反应,解释各种实验数据。这是一项艰巨而具有重要意义的工作,需做长期的探索。

同时,我们也应看到,核物理研究正面临一个转变—研究领域与理论方法的转变。

随实验手段的发展,更高性能的中高能

加速器、重离子加速器投入运转,相应探测分析技术的改善等,必然导致研究领域的转变和人们视野的扩展:从自然核素扩展到外来核素;从通常条件下的核性质扩展到极端条件下的核性质;从低能核物理扩展到中、高能核物理。

随研究领域的扩展和转变,必要求理论方法的扩展和转变。任何科学理论都不是孤立的,都可能与其它学科有着密切的联系。弱电流—理论,QCD在核物理中的应用就正像量子力学在原子、分子、量子多体理论中的应用一样。粒子物理与核物理中的一些反应过程可揭示出宇宙的起源和演化,中子星的形成与超新星的爆炸。因而出现了许多新的学科:天体粒子物理、天体核物理、天体原子、分子物理、天体化学和天体力学等。粒子物理的横向发展和天体物理的纵深发展与核物理的交叉,使得理论方法转变成为可能并开辟了新的研究领域。理论方法从非相对论量子核子动力学(QND)扩展到相对论量子强子动力学(QHD),再扩展到量子色动力学(QCD)。人们企图把核物理建立在相对论量子场论的基础上,以弱电统一理论和QCD为基础描述原子核系统。这是一个宏伟诱人而又极其艰巨的任务,困难很多。

能否实现呢?这需对QND、QHD和QCD三者的关系进行分析。三者关系如下表所示。

| 描述核系统的理论 | QND   | QHD                                | QCD              |
|----------|---|------------------------------------|------------------|
| 对核系统的看法  | 质子、中子多体系统   | 强子(重子、介子)多体系统                      | 夸克—胶子多体系统        |
| 关系       | $\xrightarrow{\text{自由度解冻,子空间扩张}}$<br>$\xleftarrow{\text{自由度冻结,子空间收缩}}$ |                                    |                  |
| 困难       | 核力问题;<br>多体问题   | 强作用问题;<br>与自由度冻结联系的多体问题;<br>一般多体问题 | 强色力处理问题;<br>多体问题 |

能用QCD解决核物理的问题吗?原则上也许可行,而实际上却难行得通。

用QCD解决核物理问题时,对高能反

应和 QCD 可能行,或许用 QCD、QHD 来改进 QND 是更好的途径;对中能反应和结合态,以 QND 为基础考虑更多的 QHD、QCD 修正是一种方法,对某些问题可能用 QCD 与 QHD 的难象理论是更好的方法;对低能结合态问题, QCD 不能处理,可能用 QND 加 QHD 和 QCD 的修正较好,或对个别问题应考虑 QCD、QHD 的难象理论。这正如对 QED,目前有成功的反应(散射)微扰论,却没有成功的结合态理论(非微扰的)。对于 QCD,结合态问题更为困难。

总之,在处理核问题时,不能把现有的 QND、QHD、QCD 理论僵硬化,也许在三种理论的变形、软化、衔接和连通上下功夫是更正确的途径。从上表的三者关系看,由 QND  $\rightarrow$  QHD  $\rightarrow$  QCD,相应的是能量的提高,自由度解冻和子空间扩张,反之亦然。无论是结构或反应,能量 E 实际上表现为是时空流形上的非均匀分布,在高压下更为突出。高能重离子碰撞和质子-核碰撞产生的热斑所引起的液-汽相变是极好的证据。核系统实际上是建于时空流形上的可变的系统。僵硬化的处理,可能对核的局部性处理带来某些成功,却不能对核的全域性处理给予很好的描述。从系统论的观点来分析核系统,核系统的性质并不是各子系统性质的简单相加,而是各子系统的复杂的非线性耦合,既改变了各子系统的性质,也赋予核系统以各子系统所没有的新的整体性质。因此,现有理论僵硬化的处理,显然不能全面而深刻地去模拟动态的核系统。用连通的观点来对待现有理论,在核系统这个实验室中,不仅可以检验现有理论,而且为发展和融合这些理论开辟了广阔的空间,从而使得核物理学仍成为一个活跃的前沿领域。多体系统的数学处理,是重要的困难之一。新思想的引入,新的数学语言和概念的产生,都是十分重要的课题。这是数学工作者和物理工作者共同的任务。

核能、核技术的应用是一个重要领域。注

意核物理与其它学科,如天体物理、原子物理、分子物理、医学、农业和工业等方面的广泛交叉,不仅为核物理的应用开辟了广阔的前景,而且为交叉学科提供了新的探针。

回顾过去,核科学无论是实验或理论,都取得了巨大的进展,积累了丰富的资料 and 知识;面对现在,作为“富矿”的核系统,新的实验现象层出不穷并推动理论拓展和深化,核物理学的未来,正是在这样的基础上向前发展。一方面它是对过去、现在的继承和发展,另一方面它更是在发展基础上的创新。新颖的思想,奇特的概念,精巧的方法和技术,是引导科学突破性进展的动力。作为一个复杂而又特殊的核系统科学,这种突破不仅是必要的,也是必然的。核科学未来的希望就在于寻找突破的探索之中。