

第六次全国核物理会议 特邀报告集

核物理动态 增刊

1985

科学技术文献出版社重庆分社

第六次全国核物理会议特邀报告集

《核物理动态》编辑部 编辑
兰州市31号信箱

科学技术文献出版社重庆分社 出版
重庆市市中区胜利路91号

新华书店重庆发行所 发行
科学技术文献出版社重庆分社印刷厂 印刷

开本：787×1092毫米1/16 印张：8.5 字数：21万
1985年9月第一版 1985年9月第一次印刷

科技新书目：105—283 印数：2000

书号：13176·143

定价：1.80元

第六次全国核物理会议特邀报告集

目 录

- 核物理研究近况.....胡济民(1)
- 高能物理的发展.....朱洪元(8)
- 核物理实验技术在生物科学研究中的应用.....陆祖荫(16)
- 穆斯堡尔谱学应用研究的新进展.....郑裕芳(33)
- 活化分析的进展.....成源棣(50)
- 兰州重离子研究的进展.....邬恩九(53)
- 串列加速器工程与物理进展.....李长春 姜承烈(94)
- 近两年来原子核所的核物理研究.....石双惠(121)
- 复旦大学核物理和离子束分析研究工作进展...杨福家 陆福全(124)
- 离子束与表面层相互作用及其应用.....王忠烈(127)
- 四川大学原子核科学技术研究所工作进展.....龙先灌(132)

核物理研究近况

胡 济 民

(北京大学)

核物理是一个相当广阔的学科领域，我的知识面很窄，见闻有限，这个题目一定讲不好，不过去年参加了国际核物理会议，在国内也参加了几次学术会议，听到一些情况，根据自己的体会作一点介绍。重要的遗漏，不确当的判断，以及其他缺点错误，在所难免。欢迎批评指正。

一、核物理的传统课题

核物理是一门已经有几十年历史的学科，有些课题，例如核力，已经有四五十年的研究历史，这些课题近年来仍然取得了一些引人注目的进展。

核力问题一直是核物理的中心问题之一，多年来人们一直努力在获得精确实验数据，寻找具有较可靠理论基础的核力以及探讨核力在核多体问题中的适用性等三个方面开展研究。在实验方面主要进展在于低能极化的实验，质子质子散射极化率的测量可以准确到千分之一，质子中子散射的极化率测定优于百分之一。（参看图1，2，3，4）

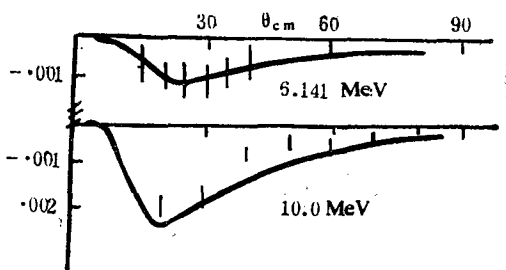


图1

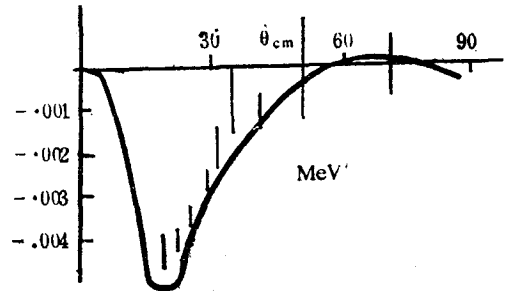


图2

图1, 2 几种不同能量的pp散射分析本征散射角的变化，曲线为巴黎势计算值。

从理论方面讲，可以把核力分成中长程和短程两个区域。大概在 $r > \approx 0.8 \text{ fm}$ 的中长程区域，核力可以从介子场论得到解释。这方面最成功的是巴黎势，（上次核物理会议上已介绍过）它的短程部分是唯象的，巴黎势只包含很少的可调参量，但是能很好地符合两体实验数据，关于短程部分，由于与核结构有密切关系，应该从夸克胶子作用得到解释。当然也可能直接从夸克模型来计算核力。在这方面也已取得一些进展，特别是有可能解释核力的排斥芯，国内在这方面也开展了一些研究工作。

用多体问题来检验核力是一个比较困难的问题，少数核子问题，（例如三体和四体问题，）和核物质问题是经常用来检验核力的两个方面。关于 ^3H 结合能的计算，应用各种符合两体问题数据的位势计算的结果均比实验值小1到1.5 MeV。 ^3He 电荷形状因子的计算，当 $g^2 > 10 \text{ fm}^{-2}$ 时，理论值都比实验值大。关于核物质的计算，各种核力的计算结果均不能同时

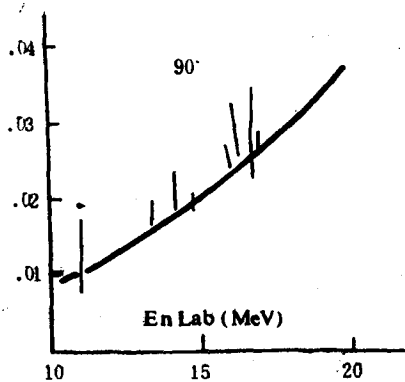


图3

图3 np90°散射极化率随中子能量的变化，曲线为巴黎势计算值。

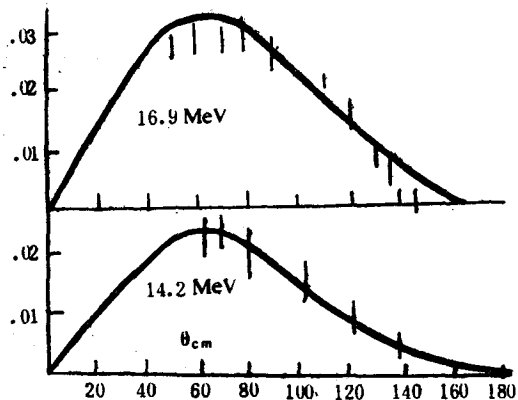


图4

图4 np散射极化率随散射角的变化，曲线为巴黎势计算值。

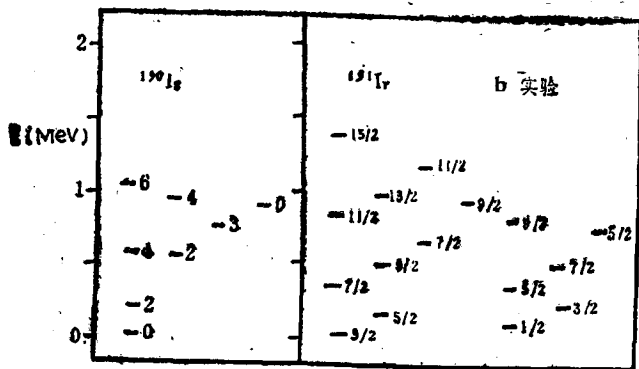
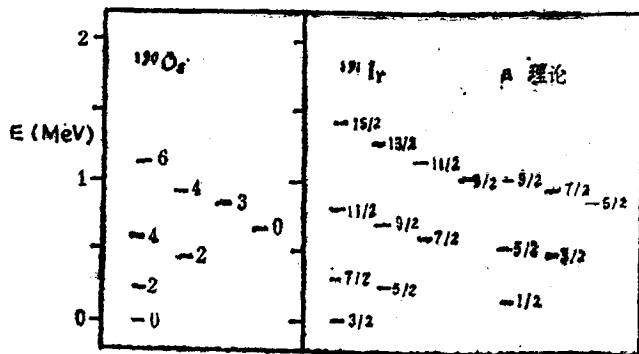


图5 ^{191}Ir 的超对称性能级结构。a根据IBM理论计算的结果，b实验能级图。

符合根据液滴模型质量公式推得的核内中心部分的核子密度和每核子的平均结合能（不考虑库仑能和表面能的影响）。例如用巴黎势计算的结果，平均结合能为16MeV，与实验值相符，而密度则比实验值大40%以上。

低激发集体运动态也是经过长期研究的核结构问题。近年来最主要的发展是相互作用玻色子模型（IBM）的提出。这是一个在壳模型基础上的唯象的模型，它的优点是能够系统地处理原子核的低激发集体运动态，特别是处于过渡区核的集体运动态。最近的发展是用具有超对称性的玻色-费米子模型处理奇核的低激发态，图5ab就是一个例子。尽管这仅仅是一个近似的模型，但是这是第一个显示这类对称性的例子。

关于核的低激发态去年曾在我国开过一次国际工作会议，关于IBM模型的应用和微观基础在我国都

曾开展工作。

原子核的巨共振 原子核的激发能超过了10MeV左右时，最引人注目的集体运动是巨共振现象，关于巨共振的新知识大部分来自强子（例如质子和 π 介子）与核的非弹散射，利用这一类核探针研究自旋和同位旋自由度的激发比较方便，例如从反应（ π^- ， π^0 ），人们找到

一个截面的峰值，它在向前散射的方向特别显著，由此发现了同位旋矢量巨单极共振。用这一类反应研究 MI 磁偶极巨共振和伽莫夫泰勒共振对于研究自旋和同位旋有关的核力以及核内的亚核自由度有重要的意义。人们发现这类巨共振的总跃迁强度在重核比理论预言要小得多。这种差异可能和核内存在 Δ 共振有关，对此目前尚不能完满地解释（其它因素难以完全排除）。

二、重离子核物理

重离子核物理是近十几年来研究工作很活跃的前沿领域，在这里只能介绍几个较为突出的发展。

新元素的合成 107 号和 109 号元素的合成是一项特出的成就。由于在离子种类和能量的选择方面，先进行了一系列的预备实验，才实现了冷熔合，反应 $^{209}\text{Bi}(^{64}\text{Cr}, n)^{262}107$ 和 $^{209}\text{Bi}(^{58}\text{Fe}, n)^{266}109$ 都只蒸发了一个中子，而且合成的是奇核，大大减小了裂变几率，因而可以观测到衰变链，便于元素鉴定。在实验设备方面使用了大型的速度选择器，可以初步确定观测到反应产物的质量，因此虽然 109 号元素只有一个事例，但由于完善的探测技术，可以初步论证这一事件表明了 109 号元素的合成。这方面的成功鼓励着人们又一次试图合成超重核。

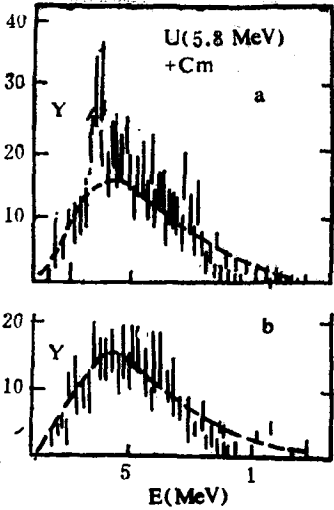


图6 U + Cm 的正电子谱

- a. 离子实验室散射角在 27.5° 到 40° 之间，显示一峰值相应延迟时间为 6.5×10^{-20} 秒。
- b. 更为向前散射离子的伴随的正电子谱，无峰值。

虚线为理论计算值，仅仅考虑离子卢瑟福散射。

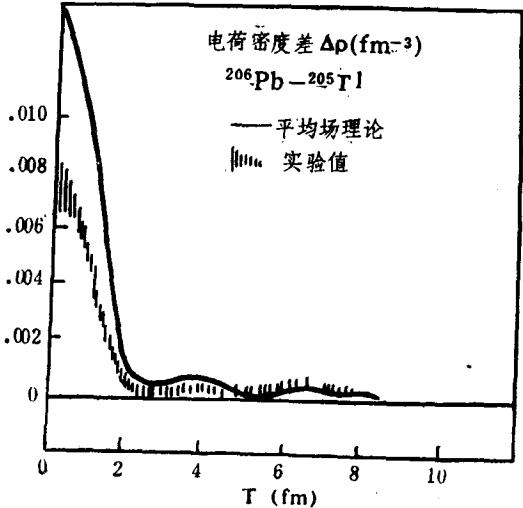


图7 由电子散射获得的 ^{205}Pb 和 ^{205}Tl 的电荷密度差，根据壳模型应为最后一个 3S 质子的电荷密度。图上明显地显示出 S 波电荷分布的特征。

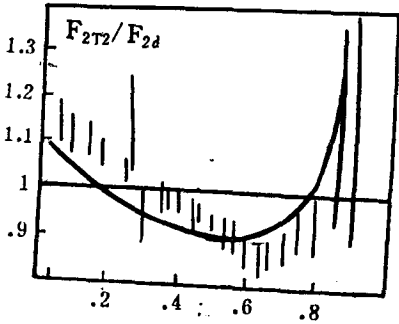


图8 由电子和 μ 子与铁和氘深度非弹散射导出的两核子结构函数的比值。x 为与动量交换平方成正比的一个无量纲量。

$$x = \frac{Q^2}{2MpC^2} \frac{1}{(E - E')},$$

$$Q^2 = -q^2 = 4EE' \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

巨核体系 我们称两个重核相碰而形成的核体系为巨核体系。如果其总的电荷超过 $173e$ 则可产生超强电场,引起正电子发射。对于两个很重的核人们发现对向后散射的离子,正电子谱具有一个明显的峰。这种线状结构一种可能的解释是这种核体系具有一个有一定寿命的准稳结构,也许这是研究这种巨核体系的一个途径,当然这种准稳结构在轻的重离子碰撞中早就发现了。(参见图6)

利用高能重离子碰撞来研究核物质的性质是进行这类实验的目的之一。现在通过对 π 子多重性的测量,已经初步得到一些核物质被压缩到四倍的迹象。当然对这类实验的解释还有很多事要做,要从这类实验中获得可靠的信息是很困难的。

三、中高能核物理

利用中高能粒子束和各种高能反应的次级粒子束作为探针来研究原子核结构的工作称为中高能核物理。

电子探针 由于分析手段的改进,电子探针愈来愈受到人们的重视,测定核的电荷分布是电子与核散射研究的传统课题。由于实验技术和理论分析方法的改进,现在已可用模型无关的方法,从实验数据获得核的电荷分布。因此通过比较满壳层核和满壳层缺或多一个质子的核的电荷分布就可以获得单质子的电荷密度分布,从而获得关于单粒子波函数的知识。图7就是一个例子,从图上清楚地显示出 $3S$ 波函数的特征,这是关于壳模型波函数一次直接的检验。

利用电子非弹散射,还可以测定跃迁电荷密度和电流密度以及核的形状。这也是近年来才能获得的关于核结构的详细信息,分析电子对氦核的弹性散射,可以判定氦核的 D -波百分比约为6%,单单用核力不能解释电子对氦核和 3He 的弹性散射和氦核电子分裂的实验结果。一定要考虑交换介子流才能算得与实验基本相符的结果。这些结论并不依赖于核力的具体形式,因此可以认为这些实验是核内存在介子流的有力证据。

最后还应指出通过高能 μ 介子和电子对核作深度非弹性散射时所发现的EMC效应。如果忽略核结构的效应,那么电子(或 μ 介子)与 ^{56}Fe 散射的结构函数应该近似地为氦核结构函数的28倍。如果考虑到屏蔽效应,则在动量交换很小的区域内 ^{56}Fe 散射所得结构函数,经过折算为两核子结构函数后,应略低于氦核的结构函数,而在大动量交换的一端,则由于费米动量的影响,略大于氦核的结构函数。实验结果如图8所示。如果假设核内非弹散射有30%的贡献来自 6 夸克态,则如图曲线所示,可以近似地符合实验结果。当然,还要做很多理论和实验工作,才能在这一重要问题上做出明确的结论。

介子探针 前面已经指出,在研究巨共振时,人们往往使用 π 介子探针,特别是同位旋矢量单极巨共振,只是通过 $(\pi^{\pm}, \pi^0)$ 反应才发现的。近年来,由于分析设备的进步,从实验精确度看, π 介子已接近电子的水平,使用介子,其优点在于可以有更多类型的反应,例如通过 (π^+, π^-) 反应可以产生 $\Delta T = 2$ 的同位旋相似态,利用 K 介子还可以产生各种超核,这是一个非常广阔的领域,其缺点在于理论处理比较困难,往往不能和电子一样,提供关于核结构很确定的信息。

四、核物理与其它学科

核技术的广泛应用是科学技术现代化的重要标志之一,很难设想有那一个科学技术部门不能从核技术应用中得到好处。应该说,这是核物理学中最最引人注目的一个方面,也是核物理受到科技界普遍重视的原因之一。要想用很短的篇幅介绍这方面的最新成就,即非我的力所能及,也是很难做到的事。因此,我想举出核技术在聚变能源方面几种最新的,可能的

应用。

极化核聚变堆 核反应截面一般是和参与反应的核的自旋取向有关的,以氘^(D)氚^(T)反应为例,如两核的自旋取向相反,生成中子和⁴He的截面要比非极化束的平均截面大50%。因此用极化束可以提高反应产额,目前关于极化离子源的发展,已有可能获得很强的极化束,理论估计,在进行聚变反应的等离子体中,极化可以保持一个相当长的时间(如仅仅考察通过离子间的碰撞退极化,氘和氚的极化程度分别可以保持10⁵秒和10⁶秒)。当然还有一些别的因素可能引起退极化,估计在一两年内,当大功率极化源制成后,即可在现有的试验装置上进行实验验证。

重离子束惯性约束聚变 这是近年来受到注意的一个方向,作为有效的打靶束流,要具备下列条件:(1)脉冲功率10¹⁴瓦,能量为几个兆焦耳,效率10%到20%;(2)束流聚焦到几个毫米直径的靶;(3)全部能量应该沉积在靶的表面,深度不超过0.1g/cm²,否则不能有效地压缩;(4)每秒10到20个脉冲,装置寿命应达到30年,造价不高于几亿美金。根据现有加速重离子的技术,这些条件是可以在近期内达到的。而用其它束流,虽然可以进行试验,要全面达到上述要求都有困难,目前这方面一个主要不定因素是空间电荷对重离子束聚焦的影响,在这方面没有进行实验研究。

μ 子催化聚变 当 μ 子束注进D, T混合物时,如能形成 μ 分子DT μ ,则D, T发生聚变反应而释放 μ ,而 μ 又能形成新的DT μ ,引起新的裂变,原来的理论计算表明,形成DT μ 的几率比较小,一个 μ 子在衰变前只能引起一个聚变,这当然在能量上不合算,近来人们发现DT μ 的一个能级和分子团DT μ -D或DT μ -T的一个能级能量偶然相同,而T μ 与D₂或DT结合这种分子团的几率相当大。如能把 μ 子从 α 粒子的俘获中解脱出来,一个 μ 子可以促成100到1000次聚变。实验上已经在127℃,密度为液氢的60%的DT介质中获得每 μ 子引起70个聚变的结果,复活了实现冷聚变的希望。当然这方面还有很多实验和理论工作要做,最主要是要设法把 μ 子从 α 粒子的俘获中解放出来,以及进一步验证生成DT μ 的机制。

上面这些情况又一次给我们指出,基础研究所发展的先进技术往往具有重大的应用可能性。

五、实验和加速技术

应该指出,上述各种成就都和实验技术和加速技术的发展有紧密的关系。当然,最引人注目的是多参量数据获取系统的发展和新的加速器的建立,在这里只能作一些简单的介绍。

γ 射线多重探测装置 为了研究自旋态和测定重离子核反应中的 γ 多重性,人们用许多 γ 探测器组成一个球形探测器组,可以测定自球心向任何方向发射的 γ 射线,例如Heidelberg的晶体球就是由162个NaI晶体组成的多面体,其中部分晶体可以换成高分辨率的锗探测器,邻近的晶体之间还可以组成反符合系统,以减少康普顿本底。因此整个系统组成了一个高效率的 γ 谱仪,用这种系统不仅可以测定 γ 多重性等,还可以探测稀有的 γ 衰变事件,例如,已经用这种装置,探测到⁹⁰Zr 1.76MeV O⁺态到基态(O⁺)的双 γ 跃迁。这一典型的例子说明 γ 探测设备怎样从70年代通用的晶体谱仪,通过使用电子计算机,发展到价值百万美元的大型设备,从目前的趋势看,探测设备的费用,已经接近主要加速器的费用。

重离子加速技术 在近十多年来一直是一个发展迅速的部门,图9a, b, c分别画出了已在运行、正在建造和计划建造的重离子加速器。从图上可以看出,在近四五年内,运行中的重离子加速器数目将增加接近一倍,而且对于轻的重离子(A<40),每核子能量都超过或接近30MeV。而计划建造的尚有6台,重离子加速器的另一个趋势是在串列静电加速器上接

后加速系统。这样做能保持串列静电的束流品质，造价也较低，缺点是往往不能加速很重的离子。离子源的改进是重离子加速技术的另一个重要方面，我们知道重离子加速器中离子所获得的能量与离子的电荷态有关，直流型加速器离子能量正比于电荷数，而回旋型的离子能量正比于电荷数的平方，目前发展的电子共振离子源(E.C.R)已经能有效地提供18个电荷态的Kr和26个电荷态的Xe，进一步的改进，可望得到26个电荷态的Kr和30个电荷态的Xe。另一种电子束离子源则可望提供电荷态为70的U离子，强度达到每秒 10^{10} 个。

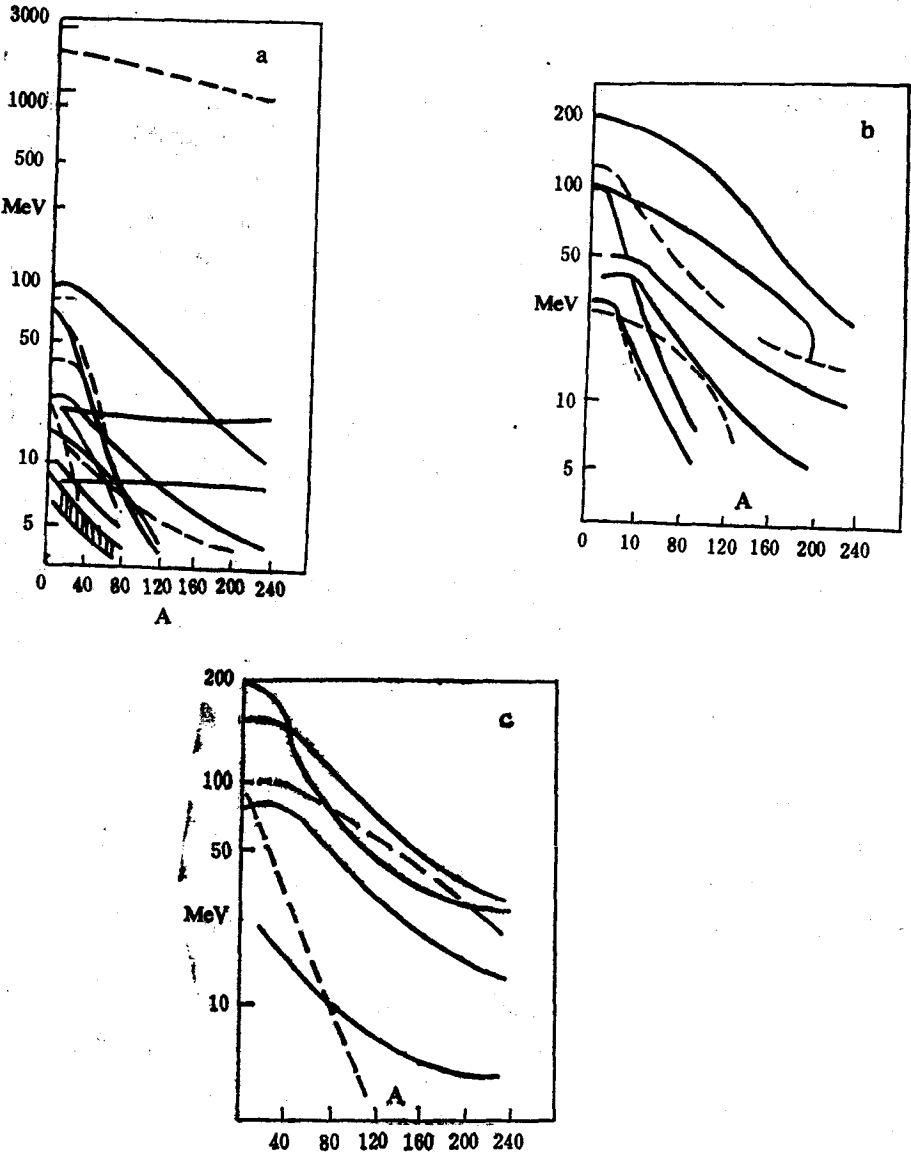


图9 重离子加速器建造情况，每一曲线表示一台设备加速离子的范围及能量。
a 现有 b 建造中 c 计划建造的

电子加速器 前面已经指出，在近年来，电子探针已发展为研究核结构的有效武器，因此电子加速器的建造也相应地受到重视，在最近的三五年内，将有十几台电子加速器建成或提高了性能后投入运行，加速能量在几百MeV到几GeV的区间，平均流强从几十到一两百个

微安,有不少加速器由于采用了脉冲拉伸环技术,将提供连续束流,同时由于发展了电子束激光散射的方法,可以得到几百MeV的单色 γ 射线,这对于利用光子探针将会是一个促进,不难看出,这些加速器的建成,投入运行,将大大推进核结构的研究。

六、结束语

上面介绍的成就大部分是贝克莱会议以后的发展,还有很多工作因为难以用几句话加以论述,未能在此介绍。仅仅从涉及的内容看,已足以说明核物理依然是一个很活跃的研究领域,新的成果不断出现,新的大型设备不断建立,人们对原子核物理这个领域表现兴趣,投入巨大的人力物力,我想,主要有以下几个因素在起作用:

1. 作为物质结构的一个层次,原子核具有独特的特点,它的运动形态具有无限的多样性。我们对这种多体系的基本性质还有许多基本问题没有弄清楚,因此研究原子核,对于推动整个物理学的发展,能够起其它研究领域所不能替代的作用。

2. 原子核是研究强作用和弱电作用的天然实验室。它和物质结构的下一个层次,粒子的结构有着极密切的关系。

另一方面,原子核物理又是研究天体演化、元素形成、星体演变等天文物理问题的必要基础。从尺度上讲,从极大到极小,原子核物理都在起着重要的作用。

3. 核能源的发展对核物理和核技术提出了许多基本的或迫切要解决的问题,毫无疑问,这是推动核物理研究一种重要的动力。

4. 核技术能提供关于物质结构及其运动形态最详细的信息又能对物质作最精细的加工,因此,核技术在材料科学、生命科学、原子分子物理以及其它科技部门都有重要的应用,而核物理研究又是核技术发展的源泉。

5. 最后还要指出,无论是核物理基础研究或核技术的应用的发展,都是和计算技术和信息处理能力的进展分不开的。这些方面的发展也还不过是近十多年的事。从已经取得的成就可以预期,随着信息技术的大发展,核物理研究和核技术的应用还会以更大的步伐向前迈进。

参考文献

[1] «Proceedings of the International Conference on Nuclear Physics» Vol. 2. 主编 P. Blasi and R. A. Ricci. 意大利Tipografia Compositori-Bologna出版1983.

[2] Physics News in 1983. 主编 P. F. Schewe 美国物理学会出版。

高能物理的发展

朱 洪 元

(中国科学院高能物理所)

高能物理是经原子核物理研究和宇宙线研究中诞生出来的。在第二次世界大战以后，加速器技术、粒子探测技术和数据的获取和处理的技术迅速发展。在五十年代初加速器的能量开始超过一个GeV，从而有可能开始对高能物理现象进行系统的研究。高能物理也就开始成为物理学中一个独立的分支学科。

高能物理研究的一批重要成果是数以百计的、前所未知的粒子的发现。在本世纪二十年代，中子还没有被发现。当时人们曾经认为：自然界一切物体是由原子组成的，而原子又是由电子和原子核组成的，原子核则是由质子和电子组成的。因此归根到底，自然界一切物体都是由电子和质子组成的。所以称电子和质子为“基本粒子”。在1932年发现了中子。而且中子和质子能够相互转化，很难说谁比谁更基本。因此只能认为中子也是基本粒子。在同一年发现了正电子。很难说质子和电子比正电子更基本，更不能说正电子是由质子和电子组成的。因此只能将正电子也当作基本粒子。后来发现的粒子愈来愈多，它们能相互转化，很难说这个粒子比那个粒子更基本。在另一方面又很难设想，基本粒子的种类会多到数以百计。所以现在将“基本”二字取消，统称它们为粒子。

研究这些粒子，发现它们都是配成对的，配成的粒子称为正、反粒子。正、反粒子的一部分性质完全相同，另一部分性质完全相反。例如：电子和正电子就是一对正、反粒子，它们的质量和自旋完全相同，但它们的电荷和磁矩完全相反，又例如：中子和反中子也是一对正反粒子，它们的质量、自旋、平均寿命完全相同，但它们的磁矩完全相反。有些正、反粒子的所有质量完全相同，因此就是同一种粒子。光子和 π^0 介子就是这类粒子的二个例子。

研究这些粒子的另一个重要发现是：没有一种粒子是不生不灭，永恒不变的。在一定条件下都能产生和消灭，都能相互转化，毫无例外。直到二十年代，人们还认为电子和质子是不生不灭，永恒不变的。但后来发现，电子遇上正电子，就会相互消灭而转化为光子。反过来高能光子在原子核的库伦场中能转化为一对电子和正电子。在缺中子同位素中，质子会转化为中子而放出一个正电子和一个中微子。质子遇上反质子就会相互消灭而转化为许多介子。 π 介子和原子核相碰撞，只要能量足够高，就能转化为一对质子和反质子。因此产生和消灭是高能物理过程中非常普遍的现象。

直到本世纪二十年代，人们认为自然界就存在两种基本相互作用力。一种是万有引力，另一种是电磁力。其它的力的根源都是这二种基本相互作用力。原子核物理研究发现，自然界还存在另外二种基本相互作用，就是强相互作用和弱相互作用。在氢原子中，电子的结合能为13.6eV，这是源于电磁相互作用。在氮原子核中，平均每个核子的结合能高达 7×10^6 eV，这就是来源于强相互作用。原子核的 β 衰变就是来源于弱相互作用。这两种相互作用不能还原为万有引力相互作用和电磁相互作用。现在实验上已经发现的四种基本相互作用的强度可以用下列的无量纲参数来表达：

万有引力相互作用

$$\frac{Gm_p^2}{\hbar c} = 5.9 \times 10^{-29}$$

弱相互作用

$$\frac{G_F m_p^2 c}{\hbar^3} = 1.0 \times 10^{-5}$$

电磁相互作用

$$\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$$

强相互作用

$$\frac{g_s^2}{\hbar c} = \frac{1}{5}$$

其中 G 为万有引力常数, G_F 为费密弱相互作用常数, e 为正电子电荷, g_s 为强相互作用常数, m_p 为质子质量。在现在加速器所产生的粒子和宇宙线中的粒子的能量所能达到的范围内, 万有引力在高能物理过程中所起的作用微不足道, 但是在原子核物理和高能物理现象中, 强相互作用和弱相互作用起作用的范围普遍和电磁相互作用起作用的范围同样普遍。它们能导致多种粒子的产生、转化和消灭。

为了提供关于强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用的一些感性认识, 在表(1)中给出三个衰变过程的平均寿命, 它们是分别由这三种相互作用决定的

表 1

相互作用类型	衰变过程	平均寿命(秒)
强	$\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$	4.2×10^{-24}
电磁	$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$	8.3×10^{-17}
弱	$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$	2.2×10^{-8}

其中 γ 代表光子, π^+ 、 π^- 、 π^0 分别代表正、负、中性 π 介子, e^- 和 μ^- 分别代表电子和 μ 子, ν_e 代表和电子相应的反中微子, $\bar{\nu}_\mu$ 代表和 μ 子相应的中微子, 表(2)给出三个高能碰撞过程的总截面, 它们分别是由强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用决定的。

表 2

相互作用类型	碰撞粒子	总截面(cm^2)
强	$\pi + N$	2.5×10^{-28}
电磁	$\gamma + N$	1.0×10^{-28}
弱	$\nu_\mu + N$	6.1×10^{-37}

其中 N 代表核子, 中微子 ν_μ 的能量为100GeV。

在所有这些粒子中, 光子是传递电磁相互作用的媒介, W^+ 、 W^- 、 Z^0 中间波色子是传递弱相互作用的媒介。引力场的量子“引力子”和理论上预言的传递强相互作用的媒介“胶子”迄今还未在实验上发现。

除了光子和 W^+ 、 W^- 、 Z^0 中间波色子以外, 所有在实验上已经发现的粒子可以按照其是否参予强相互作用分为两大类: 一类参予强相互作用, 称为“强子”; 另一类不参予强相互作用, 称为“轻子”。然后又可以按自旋将强子分为两大族: 一族的自旋为半整数, 统称为“重子”; 另一族的自旋为整数, 统称为“介子”。实验上最早发现的重子是质子。最早发现的介子

是 π 介子。最早发现的轻子是电子。因为质子的质量为电子质量的1836倍,所以称前者为重子,后者为轻子。 π 介子的质量为电子质量的270倍,为质子质量的 $1/7$,介于二者之间,所以称为介子。现在实验上已经发现的质量最大的轻子是 τ 轻子。它的质量几乎是质子质量的二倍,一点也不轻。实验上已经发现的 γ 介子,它的质量约为质子质量的10倍。由于历史的局限性,早年提出来的名词:“重子”、“介子”、“轻子”已经不合适,但仍然一直沿用到今天。

已经发现的轻子共三代、六种,它们是

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

与之相应,存在三代、六种反轻子。在实验上已经发现的以百计的粒子绝大部分是强子。实验研究发现,强子并不是没有大小的点粒子,都有一定的大小。例如:质子和中子的半径都是 0.8×10^{-13} 厘米。进一步的实验研究发现,强子内部还有带点电荷的东西。因此强子是具有内部结构的粒子。强子内部带有点电荷的东西称为层子和相应的反层子。强子由层子和反层子组成。将强子按照其性质分类,发现强子形成一组一组的多重态,就像化学元素可以按照元素周期表,形成一族一族一样。从这些规律可以推断:现在实验上已经发现的强子都是由三代、六种层子及相应的反层子组成的。这三代、六种层子分别以下列符号表示

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

看来在轻子和层子之间可能存在着某种对称性。

设以 e 代表正电子的电荷,则 e 、 μ 、 τ 轻子的电荷均为 $-e$ 。 ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ 是与之相应的中微子,它们都是中性的、不带电。 u 、 c 、 t 层子的电荷均为 $\frac{2}{3}e$, d 、 s 、 b 层子的电荷均为

$-\frac{1}{3}e$ 。所有轻子和层子的自旋为 $\frac{1}{2}$,因此都服从费密统计法则。

假使引进“层子数”这一量子数,并令层子的层子数为1,反层子数的层子数为-1,则所有强子和原子核的层子数均为3的倍数。例如:介子的层子数为 0×3 ,重子的层子数为 1×3 ,反重子的层子数为 -1×3 ,氘核的层子数为 2×3 ,氦核的层子数为 4×3 ,金核的层子数为 197×3 。这是一个非常有兴趣的现象性规律。根据强子的分类,特别是对于一组一组重子的内部波函数的研究,可以推断,强子内部还隐藏着前所未有的内部自由度。在这种自由度中,每一种层子都有三种不同的状态。由于原色有红、绿、蓝三种,所以将“色”这个字借用过来,称这种自由度为“色自由度”。设将每一种层子的三种不同状态分别以拉丁字母R、G、B标志,则 u 层子可以处于

$$u^R, u^G, u^B$$

三种不同的状态。其它各种层子的三种不同状态也可以这样表示。可以将层子在色自由度中的三重态当作SU(3)群的基础表示,那末所有强子在这个SU(3)群变换中都是不变的,都是色单态。所以对于强子的结构说来,色自由度是一种隐蔽的自由度。

但这种色自由度会在高能物理过程中显示出来。高能电子和正电子相互碰撞,从而消灭并转化为许多强子,就是这样一种过程。测量这一过程的截面表明,的确存在色自由度,否则这一过程的截面的大小应该只是实验值的 $1/3$ 。

因此到目前为止，实验上已经观察到的粒子，除光子和 W^+ 、 W^- 、 Z^0 中间波色子以外，都可以归结为三代、六种轻子和相应的反轻子以及三代、六种层子和相应的反层子。每一种层子或反层子在色空间中可以处于三种不同的状态。在表(3)中给出光子， W^+ 、 W^- 、 Z^0 中间波色子，轻子和层子的一些主要性质。其中 t 层子的发现是今年七月初欧州核研究中心UA1实验组宣布的，一共只得到六个事例，质量的测量很不准确。还没有其它实验组加以证实。从表中可以看出，质量最轻的粒子是光子，它没有静止质量。在实验误差范围内，三种中微子的质量也可能等于零。但由于这些实验还不很精确，中微子的质量是否等于零，还有待更精确的实验来检验。质量最大的粒子是 Z^0 中间波色子，它的质量约为质子质量的100倍。由于处于自由状态的层子还没有被发现，表(3)中所给的层子质量是根据强子的质量值，用理论估计的处于束缚状态中的层子的质量值。可以看出轻子和层子的质量谱和原子、原子核的质量谱以及它们的能级谱很不相同。质量值之间的间距随着质量值的升高而升高。

高能物理现象一方面具有微观物理现象中普遍存在的波、粒二重性；另一方面又包含着大量的产生和消灭过程。为了反映这些特点，在理论中引进“量子场”这一概念。量子力学能反映微观世界的波、粒二重性，但是由于它所描述的是自由度数目确定的物理系统，因此不能反映粒子的产生和消灭过程。经典电磁场理论所描述的是具有无穷多自由度的系统，能够反映电磁波，其中包括光波的产生和消灭，但不能反映波、粒二重性。要建立一个既能反映微观世界的波、粒二重性，又能反映粒子的产生和消灭过程的理论，就得按照将经典力学改造成为量子力学的方法，将经典场改造成为“量子场论”。在这种理论中，场量是算符，满足一定的运动方程和对易关系或反对易关系。例如：电子应由量子旋量场 $\psi(x)$ 反映。

自由电子场可以作如下的傅里叶展开：

$$\psi(x) = \sum_{p, s} \{ a_{ps} u_{ps} e^{ipx} + b_{ps}^* v_{ps} e^{-ipx} \}$$

其中

$$P_0 = \sqrt{m_e^2 + |p|^2}$$

u

u_{ps} 和 v_{ps} 是表达自旋状态的旋量波函数。 a_{ps} 是代表一个动量为 P 、自旋取向为 s 的电子的消灭算符； b_{ps}^* 是代表一个动量为 P 、自旋取向为 s 的正电子的产生算符。因此量子场一方面反映了正、反粒子之间的不可分割的联系，另一方面又反映了产生和消灭过程的普遍性和它们之间的不可分割的联系。按照这一方法建立起来的量子电动力学，在用重整化方法处理高次近似计算结果中出现的无穷大以后，得到的理论结果和最精密的实验结果相符合。例如实验测得的电子磁矩值为：

$$(1,00115965241 \pm 0,00000000020) \frac{e\hbar}{2m_e C}$$

表 3

	粒子种类	自旋	质量 (MeV/c ²)	电荷 (e)
光 子	γ	1	0	0
中 间 波色子	W^+	1	0.1×10^4	1
	W^-	1	8.1×10^4	-1
	Z^0	1	9.4×10^4	0
轻 子	e	1/2	0.511	-1
	ν_e	1/2	$< 6 \times 10^{-5}$	0
	μ^-	1/2	1.0×10^2	-1
	ν_μ	1/2	< 0.57	0
	τ^-	1/2	1.78×10^3	-1
	ν_τ	1/2	$< 2.5 \times 10^2$	0
层 子	d	1/2	9	$-\frac{1}{3}$
	u	1/2	5	$\frac{2}{3}$
	s	1/2	1.75×10^2	$-\frac{1}{3}$
	c	1/2	1.25×10^3	$\frac{2}{3}$
	b	1/2	4.50×10^3	$-\frac{1}{3}$
	t	1/2	$\sim 3 \times 10^4 - 5 \times 10^4$	$\frac{2}{3}$

量子电动力学的理论结果在误差范围内与之符合。

关于弱相互作用的最早的理论是费密提出来的。关于强相互作用的最早的理论是汤川提出来的。前者是关于原子核 β 衰变的理论，后者是关于核子力的理论。因此这两个理论都是在原子核物理研究中诞生的。在这二个理论中，质子、中子、介子、电子、中微子都是没有内部结构的点粒子。强子内部结构的发现立刻对这二个理论产生影响，但后果并不相同。在 β 衰变中放出的电子和中微子的能量都是 MeV 数量级，相应的波长比核子半径大二个数量级。在这种情况下将核子当作点粒子处理还是一个很好的近似。因此费密的 β 衰变理论仍然可以成为一个现象性的理论。事实上直到今天，在原子核物理中研究 β 衰变仍在用费密型的理论。

但是核子力的力程、核子和介子的半径都是 10^{-13} 厘米数量级。汤川理论中的汤川力即使作为核子力的现象性理论也难于胜任。事实上后来原子核物理研究的重要理论结果，如壳层模型、综合模型，都和汤川的核子力理论没有多大关系。汤川力类似电磁力，是交换没有内部结构的点粒子产生的。现在看来，核子力是由于交换一对正、反层子产生的，因此更由于交换一对电子而产生的化学键。核子力并不是基本的强作用力，只是基本强作用力的一种表现，基本强作用力是将层子结合成为强子的力。从这个角度看，强子结构和原子结构之间的关系有些像原子结构和分子结构之间的关系。例如：氢原子和氢分子的大小都是 10^{-8} 厘米数量级，它们的结构很难截然分开。强子和原子核的大小都是 10^{-13} 厘米数量级，它们的结构也很难截然分开。正如分子结构的基本理论必须建筑在原子结构的基本理论的基础之上一样，原子核结构的基本理论也必须建筑在强子结构的基本理论的基础之上。关于强子结构的基本理论现在还处于探索阶段。因此直到现在，原子核结构的理论还处于现象性理论的阶段。

关于弱相互作用的基本理论五十年来经历了曲折的道路，已经取得决定性的成就。这一成就是两路初看起来彼此无关的进展的汇合。其中一路进展和实验的进展密切相关，从不同的弱相互作用过程的实验数据推导得的弱相互作用常数的大小差不多是相同的，这表明，不同的弱相互作用过程可能有统一的起源，宇称在弱相互作用过程中不守恒的发现对于理解弱相互作用起了十分重要的作用。后来确定弱相互作用为 V—A 型，即矢量型和赝矢量型，这表明弱相互作用和电磁相互作用相类似，可能也是通过矢量场的量子传递的，在弱相互作用和电磁相互作用之间可能存在着某种连系。这就为统一地理解电磁相互作用和弱相互作用提供启示。

另一路进展是理论在自己内部矛盾的驱使下向前发展的。费密型的弱相互作用理论中的发散困难不能用重正化的方法来处理。因此这种理论就可能是弱相互作用的现象性的近似理论，不可能是弱相互作用的基本理论。费密型弱相互作用理论中，弱相互作用不需要通过任何媒介传递，是一种直接相互作用。量子电动力学中的电磁相互作用是以光子为媒介传递的，而量子电动力学是可以重正化的。如上所述，实验上已经有迹象表明弱相互作用可能也是通过自旋为 1 的粒子作为媒介传递的。这种粒子和光子不同之处在于：光子的质量为零，它所传递的电磁力是长程力；由于弱相互作用的力程比核子力的力程还要短得多，因此传递这种力的粒子一定具有很大的质量。此外，光子不带电，但传递弱相互作用力的粒子可能带有电荷。可以按照量子电动力学的形式来建立弱相互作用的理论。这种理论有二点和量子电动力学不同，即传递弱相互作用的矢量粒子的质量不为零，而且它还带有电荷。这种理论中的发散困难的确远没有费密型弱相互作用理论那样严重，但仍然是不可重正化的。不可重正化

的原因是传递弱相互作用的矢量粒子的质量不为零而且带有电荷。

这一困难的解决是由于物理规律的定域不变性的研究开辟道路的。量子电动力学对于定域 $u(1)$ 变换具有不变性。作为万有引力的基本理论的广义相对论对于定域坐标变换具有不变性。在三十年代，曾经在理论上研究原子核强相互作用现象所呈现的同位旋不变性，建立了同位旋不变的理论，但当时建立的这种理论只对于整体同位旋变换具有不变性。在1954年，杨振宁和密耳斯研究如何建立具有定域同位旋不变性的理论。他们发现，为此必须在理论中引进三种矢量场，它们在同位旋空间中形成 $su(2)$ 群的伴随表示。在量子化以后，这些场的量子代表自旋等于1，质量等于零的粒子。这种粒子所传递的力类似电磁力和万有引力，是长程力。对于内部自由度具有定域不变性的理论称为“规范场理论”。在这种理论中必须引进一套矢量场，称为“规范场”。它们在这种内部自由度中形成这种变换群的伴随表示。假使变换是可对易的，相应的理论称为“阿贝尔规范场论”。例如量子电动力学就是阿贝尔规范场论，因为 $u(1)$ 群中的变换是可以对易的。假使变换是不可对易的，相应的理论称为“非阿贝尔规范场论”。杨振宁和密耳斯提出的理论就是一种非阿贝尔规范场论，因为 $su(2)$ 群中的变换是不可对易的。

由于在实验中观察到的长程力只有万有引力和电磁力两种，并没有观察到杨振宁和密耳斯理论所预言的长程力。所以在相当长一段时期内人们不知道如何在物理学中应用这种非阿贝尔规范场论。

直到1964年希格斯才发现，有可能既保持理论的基本方程的定域不变性，又可能使规范场的量子，自旋为1的粒子具有不等于零的质量。物理规律对于某种变换具有不变性的具体含义是：

(1) 表达物理规律的数学方程的形式在这种变换中保持不变。

(2) 描述具体物理过程的是这套方程的解，但这些解的数学形式在这种变换中未必保持不变。

(3) 这些解在变换中所获得的新的数学表式仍然是这套基本方程的解，因此它们也是客观上可能产生的物理过程的表达。

长期以来人们一直认为：代表真空的解在这种变换中是不变的。例如，真空在坐标变换后仍是真空。在量子场论中，代表真空的状态就是能量最低的状态。人们长期认为，假使物理的基本理论具有某种内部对称性，那么代表真空的解在相应的变换中也是不变的。

希格斯发现，假使在量子规范场论中表达真空的解在定域变换中不再是不变的，那么规范场所描述的自旋为1的粒子的质量就可能不等于零。希格斯的方法是在理论中引进一套标量场，称为“希格斯场”，并使希格斯场的值在代表真空的解中不为零。这就使代表真空的解在定域变换中不再保持不变。这种理论叫做“真空的对称性自发破缺”的量子场论。之后温伯格和萨拉姆将非阿贝尔规范场论从强相互作用领域移植到弱相互作用的领域，利用希格斯的方法，使真空自发破缺，建立了今天“电弱相互作用理论”。这一理论中所包含的发散困难可以用重整化方法解决。在七十年代这一理论成功地经受了九种实验的检验。在1983年1月和5月在实验中分别发现了这一理论预言的传递弱相互作用的 W^+ 、 W^- 和 E^0 中间波色子。实验测得的这些粒子的质量值和理论所预言的质量值在实验和理论的误差范围内相符合。这是这一理论的决定性的胜利。从十九世纪末发现放射性起，八十多年来经过许许多多实验家和理论家的努力，终于建立起电磁相互作用和弱相互作用相互密切连系的基本理论。这一理论和麦克斯韦建立的将电和磁统一起来的电磁理论一样，是物理学发展过程中的一个

里程碑。

物理规律的每一种不变性都导致一种相应的守恒定律。物理规律的每一种定域不变性都导致一种相应的相互作用。万有引力相互作用、电磁相互作用和弱相互作用和物理规律的定域不变性不可分割地连系在一起。当前人们集中力量研究一种强相互作用理论：“量子色动力学”是一种对于在色空间中的 $su(3)$ 变换具有定域不变性的非阿贝尔规范场论。这种理论要求存在八种矢量场，称为“胶子场”。胶子场所传递的相互作用就是强相互作用。将层子、反层子结合成为强子的就是这种力。实验发现：层子在强子内部相当自由，好像没有受到多大的束缚力似的。但是迄今为止，即使用能量最高的加速器所产生的高能粒子也没有能够将层子从强子中打出来。自由胶子的质量是零，不带电，在这方面很像光子。光子很容易产生出来。但是到目前为止，还没有能够将自由胶子产生出来。可以证明，在量子色动力学中，强相互作用的强度随着层子间距离的缩小，随着它们之间的动量传递的增加而减弱。这一性质称为“渐近自由”，它可以解释层子在强子内部相当自由这种现象。这一性质也使人有可能用微扰论的方法来探讨高动量传递的强相互作用过程。低次近似计算的结果和实验结果在定性上是符合的。但要对量子色动力学进行定量的、精密的检验，不仅需要精确的实验结果，也需要精确的理论结果。因为高次近似的贡献相当可观而又难于计算，所以目前在这方面还有困难，需要进一步努力。用量子色动力学研究大距离、低动量传递的强相互作用现象在数学上还要困难得多。量子色动力学是否是强相互作用的基本理论这一问题看来还需要经过长期的努力才能得出结论。

第二次世界大战结束以来，高能物理实验发现了一系列新现象，从而对理论提出了一系列新问题。例如：

- (1) 强相互作用的基本规律是什么？为什么直到现在还没有在实验中发现自由层子？
- (2) 弱相互作用的基本规律是什么？在弱相互作用中宇称不守恒，CP不守恒的机制是什么？
- (3) 已经发现了三代轻子和层子。到底一共有几代？为什么有那么多种层子和轻子？为什么它们有这样的质量谱？
- (4) 假使层子和轻子有内部结构，它们又是由什么东西组成？内部存在什么样的相互作用？决定它们的内部结构规律是什么？
- (5) 怎样统一地理解各种不同的基本相互作用？
- (6) 怎样统一地理解层子、轻子等费米子和传递各种基本相互作用的波色子？

W^+ 、 W^- 、 E^0 中间波色子的发现表明，我们终于在第(2)和第(5)个问题上取得了重要的进展。但即使这个电弱相互作用理论本身也存在着有待解决的问题。这个理论不能预言导致真空对称性自发破缺的希格斯粒子的质量值。在实验上至今还没有发现这种粒子。在二十年代，物理学中的基本物理常数有六个：

$$h, c, m_e, m_p, e, G$$

其中只包含三个无量纲常数：

$$\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}, \quad \frac{Gm_p^2}{\hbar c} = 5.9 \times 10^{-39}, \quad \frac{m_p}{m_e} = 1836.$$

自从高能物理实验发现了一系列新现象以来，理论中的无量纲常数已经增加到十八个。理论中存在那么多的参数这一事实表明，这个理论中有一部分具有基本理论性质，但也有很大一部分带有现象性理论的性质。我们到达全面地理解这一切现象的实质还有很长一段路要走。