

核物理相关领域的最新进展

颜家骏

(中国科学院近代物理研究所)

摘要:核物理、加速器、数据获取处理和计算机技术的突飞猛进,极大地推动了核物理相关领域的迅速进展。本文评述了在基本粒子物理、宇宙学、宇宙射线物理、原子物理这些相关领域的最新进展。

进行了。上述情况都极大地推动了核物理相关领域的迅速进展。

一、引言

长期以来把核看作是由中子和质子组成的系统,中子和质子间通过介子交换而相互作用。对于这种传统的核结构图象,我们已经进行了深入细致的研究。随着加速器能量的提高,我们认识到传统概念所描述的是空间尺度约大于 1fm 的现象。当束流能量超过几百 MeV 时,用介子交换描述的核力图象开始失灵,各展宽的核子间开始重叠。当相应能量为 GeV 量级时,此时需要描述的现象是更精细的尺度。我们发现核组分的完全夸克结构开始起作用,描述核的图象开始变成了夸克和胶子的大集团系统。这就是说开始把核看作有限饱和多体系统,把核的自由度从核子自由度展宽到同时存在夸克自由度。这两种自由度同时存在的夸克核子混合体概念开始时髦起来,并且必将揭示新的和难以捉摸的核物理现象。 GeV 加速器和重离子碰撞机是顺应核物理发展趋势的两种未来加速器类型。对此感兴趣的读者可以参阅《核物理与加速器未来一瞥》(见本刊第3卷第4期1986年),就不再详述了。

自七十年代以来,随着核物理与加速器的迅速进展,数据获取、信息处理、计算机技术和探测技术都在突飞猛进。这些都为人们提供了全新的概念和能力,过去不能进行甚至不敢想象的研究和实验,现在都能着手

二、基本粒子物理

1. 成就与问题

已经取得的重大成就包括:①提出了宇宙是由夸克和轻子组成的标准模型,并且认为通过光子、胶子、 W 粒子和 Z 粒子把夸克和轻子约束在一起;②在单规范场理论中,弱力和电磁力的统一;③依据量子色动力学解释重子和介子的结构;④提出了夸克和胶子相互作用的理论;⑤研究了自然界中所有力的大统一的可能性问题;⑥基本粒子物理和宇宙学的综合研究;⑦基本粒子的相互关系问题。

目前尚未解决的问题也就是预示未来发展趋势的问题包括:①基本粒子形形色色,貌似杂乱无章。它们的质量何以表现如此?怎样对它们进行分类?②希格斯假说用于探求如何解释对称性的破坏。如果它是正确的话,能够找到希格斯粒子吗?如果它是错误的话,用什么假说对它取而代之呢?③除去已经知道的几种以外,这些夸克和轻子是怎样形成的?为什么它们能够形成呢?④这些夸克和轻子究竟确实是基本的粒子呢,还是仍有更细的结构层呢?⑤象超对称这类新思想是正确的吗?强相互作用和电的弱相互作用能够统一吗?⑥究竟还有至今尚未发现的基本力吗?

2. 具体进展

(1) 中微子质量

关于强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用大统一的各种理论,非常引人注目。它们都要求中微子具有非零的质量。许多科学家一直寻找着关于中微子质量的证据。

目前流行的方法是研究 ${}^3\text{H}$ 的 β 衰变或研究双 β 衰变。通过半衰期测量值与计算值的比较,就可以推断出中微子质量的上限。莫斯科的一个小组研究 ${}^3\text{H}\rightarrow{}^3\text{He}+e^{-}+\nu_e$ 衰变,由电子能谱观测得到 ν_e 的质量为 $20\sim 45\text{eV}$ 。国际上有几个小组正在着手进行 ${}^{76}\text{Ge}$ 的无中微子双 β 衰变研究,估计此法可明显改善半衰期的测量精度。测量所用的探测器由苏联提供的富集 ${}^{76}\text{Ge}$ 制成,并置放在屏蔽很好的空腔中。用 ${}^{76}\text{Ge}$ 测量电子中微子的质量,其公差仅为 1eV 。Osaka小组还进行了特别有趣的实验,那就是研究 ${}^{76}\text{Ge}$ 中到激发态的跃迁,并与基态的跃迁结果进行很有意义的对比分析。

理论证明,只要存在经过带单电荷的或中性的弱玻色子变换实现的弱相互作用,那末无中微子双 β 衰变存在这个事实本身,就意味着至少有一些质量不为零的中微子。这对粒子物理和天体物理都是意义重大的。几个深思熟虑和计划周密的实验计划正在进行之中,人们希望中微子质量之谜会很快揭晓。

(2) 介子物理

传统核结构图象的形成与介子的存在密切相关,而介子与电子转换的问题也就同时产生了。当认识到 μ 介子不能衰变成电子和质子时,介子数和带电轻子数互不转换的概念就形成了。人们为了深入细致地研究标准模型,致使这个古老问题重新时髦起来。

利用TRIUMF加拿大介子设备,P. Depommier研究了 μ 介子-电子转换和总 μ 介子俘获的分支比。他初步给出的上限是 4×10^{-12} 。R. Engfer和R. Mischke报导了瑞士SLN和洛斯·阿拉莫斯实验的进展情况。有关核中 μ 介

子-电子转换和无中微子双 β 衰变这类问题,都在积极研究之中。

(3) 夸克物理

我们已经指出,核物理研究中的炮弹能量为 GeV 量级时,核组分的完全夸克结构开始起作用,描述核的图象开始变成夸克和胶子的大集团系统。这样一来,夸克物理就成了核物理和基本粒子物理的边缘交汇之处。

现在已经初步确定有两种方式可用于夸克物理的研究。一种是 GeV 电子加速器和电子探针。另一种就是重离子碰撞。利用相对论重离子碰撞机,即能在高能量密度的完全不带电的区域研究强子物质,又能在大的空间距离范围内研究重子密度。它还打开了产生和研究夸克胶子等离子体的大门,到那时夸克物理就可以真正登堂入室了。

(4) 大统一理论

粒子物理的一类热门研究,是弱电规范理论特别是弱相互作用中的夸克混合。迄今为止的结果表明,不是未知夸克与已知的三种夸克混合十分微弱,就是根本不存在第四种未知夸克。尽管辐射的弱电修正是难以捉摸的,但是它对实验结果的解释却很重要。这并不表明中性规范玻色子与光子和 Z^0 粒子相同。

P. Langacker等讨论了目前流行的一些大统一理论和超对称模型,它们与今天的质子寿命数值是可以相容的。标准模型的延伸拓广问题也正在研究之中。在DESY进行的研究表明,能够评述涉及明显不同的现象的模型。这些现象诸如较小的中微子质量、一些无形的轴子和宇宙中的重子不对称性等。已有可能从这些模型中找到一个共同的前提。这就启示人们,除了探索高能前沿之外,在低能实验中的一些难以捉摸的现象,今天又是大有可为了。这些现象包括中微子质量、无中微子双 β 衰变、中微子振荡、中微子衰变和 μ 介子衰变。

当引力作用和电磁作用可以相互比较

时，低于普朗克质量 10^{19}GeV 的大统一理论是不那么简单的，对此J. Derendinger已经加以论述。在超过这个能量级别时，超弦理论通向大统一论。Q. Shafi已指出了在超弦模型中存在量子数违反现象。

(5) 实验手段的进展

加速器能量的提高。现有的电子-正电子-存储环和固定靶加速器上，能量已达几十MeV。一批更高能量的碰撞机正在建造之中，而在斯坦福直线加速器中心正在进行 e^+e^- 存储环的一种替代方案。后者避免了粒子加速时的同步辐射损失。斯坦福直线对撞机(SLC)和CERN的大型正负电子对撞机(LEP)可把最大能量分别提高到140和200 GeV。费米实验室的质子反质子对撞机将使人们拥有TeV能量的存储环。

加速器以外进行的实验。借助于太阳用大的地下探测系统研究质子衰变和测量中微子产生率；通过宇宙射线研究探查很高能粒子的相互作用；通过多种多样的实验研究磁单极子、自由夸克和中微子质量；通过原子物理实验对量子电动力学进行重要检测和对基本对称性原理进行研究。

3. 发展趋势

①在现有加速器上，对标准模型进行大量的改进检测。象磁矩、电荷半径和质量这类强子统计特性的研究；强子物理中的极化效应研究；在 J/ψ 系列中夸克偶素态的进一步详细研究；在来自核的电子、 μ 介子和中微子的深度非弹性散射中标度无关性破坏的研究等。

②在未来的SLC和LEP上研究 Z_0 粒子。因为在100 GeV以上的 e^+e^- 碰撞中大量产生 Z_0 粒子。精确测量 Z_0 的质量和寿命，可以验证理论预期值。寿命和产物生成率也能确定夸克和轻子种类的数目，这些夸克和轻子当然是作为衰变产物而存在的。或许还能观测到希格斯玻色子。

在未来的费米实验室的核电子伏对撞机上，主要用于研究带电W粒子。W粒子的质

量是弱电相互作用理论中的决定性参数。如果它是重量高达约500 GeV的另一个中重玻色子，尽管这出乎标准模型的预期值之外，我们将能在核电子伏对撞机实验中发现它。理论推测中的一种有利的可能性是右旋 W^+ 粒子。如果希格斯玻色子的质量不超过100 GeV，在实验中将不能发现它。无论是上述情况的哪一种，都将是超过几百 GeV的未被探索过的领域的第一次出击，而这种机会是TeV对撞机提供的。

在九十年代初期以前用上述装置，彻底检验QCD和标准的弱电相互作用理论。此后将要建成40 TeV的超导超级对撞机(SSC)，预计那时就会出现实质性突破。

三、宇宙学

1. 现有成就

在观测今日宇宙和推测昔日宇宙的能力方面，都取得很大进展，引起宇宙学的一场大变革。象哈勃膨胀的观测数据和3K黑体辐射的宇宙射线本底的存在，都强烈支持大爆炸宇宙论。轻核是宇宙大爆炸的遗迹，并给出了有关宇宙模型定量情况的另一个重要依据。

2. 宇宙起源

把宇宙起源后几分钟的情况看作质子和中子聚变并形成轻元素，观测表明是恰如其分。这些轻元素现在的丰度反映了大爆炸初期的重子密度和膨胀速率。依据标准宇宙模型能够算出 He^4 的丰度，这个数值与太阳中 He^4 的丰度符合甚好。另外，这种符合还决定于只存在种类不多的中微子。对于粒子物理来说，这是重要的推论。

3. 宇宙模型

膨胀宇宙是最激动人心的宇宙模型之一。它就是依据来自基本粒子物理的思想。根据大统一理论已作出许多努力，希望解释在宇宙中物质超过反物质的原因。理论预言能够重建早期宇宙的极高能量密度时宇宙的基本

对称性。宇宙学者提出了检验这种思想的一些方法。

4. 宇宙物质

观测表明可见物质的引力场，不能解释星团中星座整体和表面的某些运动，由此得出结论宇宙中的绝大多数物质是无形的。宇宙学家对上述推论曾长期迷惑不解。现在粒子物理最时髦的理论提出，组成这类物质的粒子可能是重的中微子和轴子等。宇宙学家又对上述理论增添了若干限制，那就是Relic粒子必须足够丰富，以致今天能够约束住星座；并且必须变成非相对论粒子，以便靠引力得以结合成块。

5. 未来观测

宇宙学特别渴望获取数据，寄希望于各种地球人造卫星的观测。所用装置将有 γ 射线观测站、哈勃空间望远镜、改进的X射线天体物理学装置、航天飞机红外望远镜装置、宇宙射线本底探险者等。特别是哈勃望远镜。它是测定哈勃常数的理想仪器，能够详细观测附近星座和远距离星座，更好地理解星座包括演化在内的物理性质，探查星座间介质的热的历史，从而推论所受到的宇宙结构形成时的强烈影响。必须指出，宇宙学必须依靠多学科专家的共同努力。

四、宇宙射线物理

1. 研究重点的转移

近几年来宇宙射线研究的重点，已经从大气层外碰撞产生的宇宙射线的研究转向了初级粒子的组成和能谱的研究。这些初级粒子是一些原子核和电子，它们引起大气层中的宇宙射线簇射，并且它们只是来自太阳系外的物质的直接的例子。

2. 宇宙射线的来源

组成太阳系的物质表明它作为星际物质约在46亿年前。宇宙射线却年轻得多，它经受加速之后只有约一千万年。最新观测表明，宇宙射线或许实际上表现为平均星际介

质，而不是太阳系物质的一个典型例子，并且还可能受到了附近的超新星爆炸的污染。弄清楚宇宙射线和太阳系物质这两者在组成上的不同是个困难的问题，因为这既需要更好的实验数据，又需要更加全面地理解宇宙射线如何加速的过程以及核合成的可能的新情况。在能量超过 10^{14} eV到 10^{15} eV时，星系的加速和污染机制就开始不那未成功了。尽管如此，测到的宇宙射线能谱还是延伸到 10^{20} eV。如此高能量的宇宙射线或许来自星系的局部超星团，或许来自我们的银河系，由现在还不知道的星系晕圈磁场把它们弯回到银河系平面。无论这些超高能宇宙射线有什么样的起源，它们都是宇宙学和天体物理学的重要课题，并且还是通往高能粒子物理的一个桥梁。

3. 空气簇射

上述超高能宇宙射线通量很低，用航天器和气球上的小探测器无法研究。大的地面仪器虽既能够观测，但也有严重缺点。不过当初级粒子在大气层外围相互作用时产生次级宇宙射线的簇射，却只有在地球表面才能研究。然而，由次级射线反推出初级射线的情况却并不容易，这要涉及到初级宇宙射线的识别鉴定，并且还要把在实验室中研究的相互作用过程外推到刚开始研究的如此高能量的情况。

4. 发展趋势

(1) 地面为基础的研究

γ 射线天文学在地面为基础的研究中居最领先地位。著名的美国复眼实验用于重建空气簇射，计划研制探索研究中微子天文学的探测系统。现正进行的地下设备用于研究质子衰变，也应探索研究象用于 μ 介子和中微子等的探测器。

(2) 空间为基础的研究

它是观测宇宙射线物理学的核心。处于最领先地位的第一个进展是用于空间站的超导磁谱仪装置，它将用于对超过1GeV的高能银河系粒子进行种类繁多的测量。第二个进

展是宇宙射线组成探险者(美国卫星, CR-CE)。空间站的建立将为宇宙射线研究展现出重要的新机会,今后将能进行三类实验。大探测器阵列将用于探测高能宇宙射线;大电子学探测器将用于研究数百种铀系核素并测定它们的能谱;俯视探测器将用于观测高能宇宙射线引起的空气簇射造成的大气层闪烁。另外已经设想,如何制作发送推进装置,以便把观测仪器发送到太阳系影响之外的空间。

五、原子物理

1. 基本检测和高精度技术

原子物理技术已用于提供自然界基本定律的精确检测。主要进展如下。曾通过研究中子的偶极矩,以新水平的灵敏度检测了时间反演不变性。曾用激光干涉仪以 10^{15} 分之几的精度,证实了空间相对于光速的各向同性。曾在原子中观测到由于弱电相互作用造成的宇称破坏。曾用火箭运载的原子钟,以大于 10^{14} 分之一之的稳定度,测量了地球引力对于时间过程的影响。曾在电磁捕集器中使用单个电子或正电子的实验中,以 10^9 分之40的精度测量了电子的反常磁矩。上述测量与以 10^9 分之9的精度最新测到的兰姆位移一起,都是量子电动力学最需要的检测之一。

使用单粒子捕集器的新形式测量电子磁矩的可行性很重要。如果能够进行相应的理论计算,就能进一步检验量子电动力学,并且能以 10^{19} 分之1的精度验证CPT的不变性。

在快离子束中现在已能得到仅有一个或几个电子的高电荷离子。最近已得到把91个或92个电子剥离掉的铀离子。这种类氢的铀离子的研究将开辟出物理现象的新研究领域,为研究辐射效应和相对论效应提供了难得的新机会。

2. 多电子原子

把电子作为独立粒子的理论处理方法,成功地描述了多电子原子的总特色。最近的实验已揭示了一系列现象,却不是用过去的简单模型所能解释的。电子-电子相互作用引起的相对运动,是必须计算在内的。如何识别相关系统中动力学对称性已经取得了理论进展,在相对运动和强外加场中单电子运动之间对应关系已经发现。上述情况都有待我们进一步理解。在新类型的高分辨电子散射实验中,已经研究过双电子系统。最新的实验和理论进展都启示人们,应该首先获取几乎全裸的高Z值原子,然后进行计划周密的研究,尽量洞察有关的新现象。人们将会由此得到全新的知识,从而引起化学和材料科学的知识不断扩充和更新,在许多应用领域开辟出广阔的新天地。

3. 原子系统瞬变态

在离子和原子或其它离子的激烈碰撞期间,会存在一些瞬变电子学状态。研究它们会发现一些近似的规律和现象,象电子加速模型。这个模型能够解释离子-原子碰撞期间意外的X射线发射。

我们将来能够进行这类实验,所涉及的每个重要变量都先测出,然后对复杂的碰撞现象用定量理论加以补充。用这类实验研究原子瞬变态,是过去不曾有过的机会。对于复杂的多电子系统如何进行分类和动力学描述,是个意义重大的问题。我们借助实验探索出隐含的对称性等规律,就能够朝着问题的最终解决迈出十分关键的一步。

自七十年代以来,核物理、加速器、数据获取处理和计算机技术的突飞猛进,极大地推动了核物理相关领域的迅速进展。不难看出,这些相关领域和核物理之间的关系,已经变得越来越密切,学科的相互渗透和边缘性越来越明显了。当它们并肩携手不断突破之日,就是我们迅速接近自然奥秘之时了。

参考文献

1. G. Farser, «CERN Courier», May, 1986

2. R. Stock, 《核物理动态》第3卷第1、2期, 1986

3. 戴光曦, 《核物理动态》第3卷第4期, 1986

4. 颜家骏, 《核物理动态》第3卷第4期, 1986

5. B. Kayser, Physics Today, January, 1986

6. A. Arima, Nucl. Phys. A446 Nos1-2 (1985)

45C

7. D. Lissauer, Nucl. Phys. A461 Nos1-2 (1987)

93C

8. P. D. Barnes, Nucl. Phys. A450 (1986) 43C

9. L. Van Hove, Nucl. Phys. A461 Nos1-2 (1987)

3C

10. F. Halzen, Nucl. Phys. A461 Nos1-2 (1987)

181C