

电子加速器在核物理研究中的应用进展

王兴华

(中国科学院近代物理研究所)

摘要: 在核物理研究和粒子物理研究中, 电子加速器起着十分重要的作用。本文讨论了上述领域的最新进展。主要内容包括利用电子加速器提供的电子进行散射实验的优点、进展中的电子散射装置、利用电子散射进行核研究的总的情况、已经取得的主要成就、面临的难题和解决方法、新的实验方法和电子散射装置, 最后进行了简短的展望。

一、电子加速器的特点

1. 电子散射的优点

在核物理和粒子物理研究中, 电子加速器起着重要的作用。用电子散射方法研究核结构取得的巨大成功, 归功于它的一系列特点。电子能够深深贯穿到核中, 并且在与核组分相互作用时不会明显改变核结构。由于能够各自独立地改变电子转移给核的动量和能量, 电子的空间分辨能够调整到实验所需的精度, 并且电子作为原始束流能够用加速器加速, 这是介子和中微子等无法相比的。电子加速器能够达到很高的束流品质, 很高的流强, 很小的发散度, 并且能量分辨高。上述特点使电子束流成功地用于研究核结构方面的大量课题, 并且已给出了最精确和最可靠的数据, 这些数据相对于其它方法得到的数据而言系统误差最小。

2. 进展中的电子散射装置

现在许多新的电子散射装置正在建造之中。到1992年随着它们的建造完成, 将会更上一层楼。它们能够提供连续束流、高的入射能和能量分辨、极化束流和极化靶, 并且标记散射电子的单色光子的通量高。其中提供连续束流是最大的进步, 目前的大多数同类装置有荷因数仅为1%。具有更大得多的立体角、超过平面探测能力的新型探测器正在建造之中。在Bonn、Mainz、Amsterdam和

Bates-MIT的设备改进和更新, 将使电子加速器在核物理中的应用更加展宽。在苏联也在进行同样的努力。目前最时髦的样式是高强度超导加速器, 并且可以同时提供多个束流, 束流能量直到几个GeV连续可调。这类样式中, 目前正在CEBAF建造, 而在法国和意大利尚处计划之中, 法国的方案预计在1989年年底提出。

二、电子散射与核的探测

1. 总的情况

用电子散射方法对整个核体积进行探测和研究时, 空间分辨直接决定于入射能量。当入射电子能量为500MeV时, 空间分辨约为0.5fm, 已经足以胜任研究核中的核子分布了。在电子能量更高时, 才适用于研究核中的基本物理过程。在电子能量大于10GeV时, 就可以研究核中夸克及其分布问题了。

在电子散射中, 入射电子对核的散射角为 θ 时, 对核的转移动量和能量分别为 \vec{q} 和 ω 。在普通实验中, 并不知道核的终态。而在特殊的实验中, 对于核的一些特殊终态事先选定并用实验分析研究。当终态出现两个以上的粒子时, 就要对一些核的退激产物进行符合测量。对于固定动量转移 \vec{q} 的情况, 已经详细研究了作为能量转移 ω 函数的电子-核散射和电子-核子散射。低能量、低动量转移区相当于常规核谱学研究。关系图中出现

的第一个峰相当于基态的弹性散射，其后的峰来自低激发态和巨多极共振。在较高能量转移时，截面增加，并随 ω 有平稳上升趋势，这相当于持续激发区。当截面达到该区的极大值 $\omega = q^2/2M_{nucleon}$ 时，这相当于来自若干单个核子的准弹性散射。由于核子共振的存在，这个峰在更高能量转移处平滑展宽。在 q 和 ω 都很大的极限情况下，就达到了核子组分的散射区。在该区证实过类基本粒子的存在，W. Panofsky等就曾发现过部分子⁽¹⁾。在该区，铁和氘中散射行为的不同，就是J. Aubert报导的深部非弹EMC效应⁽²⁾。研究表明，此时核介质改变了核子中夸克的分布。

2. 已经取得的主要成就

电子散射用于核结构探测的潜力很大，但有一些明显的实验困难需要克服。实验中的截面小，并且具有与高能物理实验有关的典型复杂性。为了得到核电荷和磁化密度的细节，还需要足够高的动量转移，这就要另外考虑许多问题。这就要用Huge磁谱仪，以便有大的立体角、宽的动量接收和强电子束流接收能力。当实验需要分离出一些特殊的核激发时，困难就更多了。当能量分辨为 10^{-4} 时，就勉强可以满足核物理研究的需要了。在五十年代中期，人们就尝试研究用于实验装置的新方案。在七十年代中期致力于研究探测和数据获取系统。在过去十多年

中，系统研究如何拓广电子散射在核物理学中的应用能力。

B. Frois已经报导最新的电子散射装置已经提供了有关核结构的大量新信息^(3,4)。现在已经打算并开始用更高的精度，对整个周期表中的元素进行核基态电荷和磁化密度的测量，其中心区的精度可达1%左右。已经发现，甚至在核的中心区，核子在平均场中运动的概念都是成立的。已经系统研究了单粒子激发和集体激发，并由此检验传统理论模型的适用范围。主要发现如下：对于 ^3H 、 ^3He 、 ^4He 轻核及更重的核和核物质的束缚能，核子分布的形状，在 $Q^2 \geq 0.3(\text{GeV}/c)^2$ 时 ^3H 和 ^3He 的弹性形式因子，上述现象的传统描述都进行了必要的修正。必须在只从核子出发的核传统概念中添加新内容。在 $Q^2 = 1(\text{GeV}/c)^2$ 时，就必须考虑核中的介子交换流、三体力 and 核子运动引起的相对论效应。

在八十年代，用弱相互作用和电磁相互作用这两种途径，都已经很精确地测量了核粒子流。这些研究已经揭示了几个介子交换流占优势的过程。已经分离出几个特殊的介子交换过程，并且在核子间相对距离大于0.8 fm时测定了上述过程中的介子分布。甚至动量转移直到 $Q^2 = 1(\text{GeV}/c)^2$ 的情况下，无论用介子、核子和 Δ 激发的观点对于核电荷和核粒子流分布的描述都是十分一致的。已用

已经建成的用于核物理研究的电子加速器

(打*者可以提供极化束流)

| 装 置 | 地 址 | 类 型 | 能量 MeV | 平均流 强 μA | 有荷 因数% |
|------------|------------------------|---------------|-----------|------------------------|-----------|
| Illinois | Urbana, IL, USA | microtron | 100 | 10 | 100 |
| MAX | Lund, Sweden | microtron/PSR | 100 | 30 | ≥ 90 |
| Tohoku | Sendai, Japan | linac/PSR | 150 | 3 | 90 |
| SAL | Saskatoon, Canada | linac | 300 | 70 | 0.1 |
| Frascati | Frascati, Italy | linac | 400 | 80 | 1 |
| MEA/NIKHEF | Amsterdam, Netherlands | linac | 500 | 30 | 1 |
| ALS | Saclay, France | linac | 600 | 100 | 1 |
| *Bates/MIT | Middleton, MA, USA | linac | 1060 | 40 | 1 |
| *SLAC/NPAS | Palo Alto, CA, USA | linac | 6000 | 15 | 0.03 |

单 π 介子交换测定了长程相互作用,而中程相互作用是从 2π 交换相关的观点通过弥散关系进行了描述。对于两个核子间距离大于 0.8fm 的情况,已经用电子散射测定了 μ 介子交换的空间分布。在核子距离更小时的情况,国际上就很少有报导了,而这正是用更高能量的电子加速器和用连续束流才能进行研究的领域。

3. 面临的难题和可能的解决方法

从核子被核物质和介子场包围的观点出发,用具有唯象的双核子势的非相对论薛定谔方程,进行的核描述是传统方式的描述。对于动量转移直到约 $1(\text{GeV}/c)^2$ 的核过程,介子理论都能给出有效而实用的描述。但是对于更高动量转移的情况,上述理论就不那么美妙了。除了相对论效应以外,还必须考虑短程相互作用,对此至今所知甚少。为了描述很短程相互作用,必须不断引入质量越来越高的介子。单玻色子近似已显得不够,描述核势的很短程组分需要引入一组强耦合介子。对于动量转移大于 $1(\text{GeV}/c)^2$ 的情况,显然核相互作用的介子描述已经不再那么简单了。这时就不只需要引入单体和双体算符,而且需要引入三体、四体甚至多体算符了,这些算符涉及到一些介子和核子以及核子激发的整个谱。超过 $Q^2=1(\text{GeV}/c)^2$ 时,扰动近似也变得缺乏吸引力了。此时就要面临一种新的挑战,那就是要寻找一种统一的理论描述,能够同时适用于短程和长程这两种相互作用的描述。

为了理解和弄清楚更高动量转移时的数据,必须使核子-核子相互作用的描述与核子亚结构相互一致。这就要求弄清楚核子结构,根据QCD研究出新的理论框架,使之既适用于非唯象的长波相互作用,又能适用于唯象的短波相互作用。这也正是当前核物理学界面临的最有吸引力的课题之一。核物理的长远目标之一就是弄清楚核中的强子相互作用和夸克动力学。高能电子的突出特点就在于能够提供下述课题的定量数据。这些课

题包括:核子的结构(自旋结构、共振等);核中非核子组分的作用;短程核子相互作用的实质;核力中短程部分的来源;与夸克分布有关的核介质的一些效应等。

在高能物理方面进行了一系列最新实验,并且根据QCD已对束缚态的性质进行了许多理论探讨,L. Frankfurt等对此作过及时的评述⁽⁶⁾。这些实验和探讨指明了今后研究的一些可能取得突破的方向。普遍的看法是探索和研究在核子中和在核中之间夸克-胶子分布的不同、核中短程相互作用力和非核子自由度。至关重要的是研究核中相互紧靠的二个、三个、四个甚至更多核子的组态以及测定这些组态的几率和它们的夸克-胶子结构等。研究这些组态需要把足够大的能量转移给核的相应组分。显然这意味着,微观核物理的长远未来已经成了高能研究中引人注目的领域。为了获取双核子或双夸克相关系统的详细知识,必须研究快速迁移一个核子或一个夸克的过程。当应用突然近似时必要的实验条件是转移给相应系统的能量要比它的典型能量标度大得非常多。 $Q^2 > 1(\text{GeV}/c)^2$ 时发生准弹性电子散射;而在转移给一个被敲击核子的平均能量约为 1GeV 时,就发生深部非弹性散射。这两种情况都满足前面要求的实验条件。

三、新的实验方法和新的电子散射装置

1. 探索新的实验方法

未来电子散射实验的两大要求是高的实验精度和能够探测稀有事件。这样的实验要求设计精巧,匠心独运,才能克服不希望的本底。另外,还需要大立体角的探测器,并且还要系统研究极化自由度问题。大量的强子加速器和电子加速器在九十年代都将采用内靶。这种方式实际上在CERN已经使用过,而且至今在苏联的Novosibirsk仍在使用。设计中的PEGASYS计划在SLAC的PEP环上建

造内靶以便开展高能核物理研究。J. Duclos最近指出,内靶是用于核物理研究的电子加速器的主要进展之一,对于采用极化靶进行的实验就更是如此。电子散射实验的整个面貌,在九十年代将会发生巨大变化,会有恍如隔世之感。不久就可以得到连续束流,这将使过去望而却步的许多实验得以进行。几种新的实验方法正在研究和不断开拓应用之中。这些新方法包括采用极化束流、采用极化靶、反冲极化探测、大立体角探测器和采用内靶等。可以预期极化实验将发挥重要作用。通过在SLAC研究弱相互作用和电磁相互作用的之间的扰动,已经证实了自旋物理的重要性。这种扰动曾经证实过宇称不守恒,并且这类观测曾经是标准模型的巨大成功。

J. Ashman等报导⁽⁹⁾,用极化介子束在极化质子靶上的散射,测量了质子的自旋结构,这个测量被看作是1988年核物理学取得的最激动人心的成果之一。如果使用HERA的电子束,可以明显提高上述测量的精度。在HERA计划进行新的实验,目标是测量质子和中子的自旋结构。计划使用35GeV存储电子束轰击极化靶,这些极化靶是由Madison和Heidelberg协作组在Argonne和CalTech研制的。Jaffe等进行高能极化实验时,得到了一个新的有吸引力的例证。他们强调了采用极化靶的重要,并且实验表明有可能观测到新的EMC效应。

2. 修建新的电子散射装置

目前用于核物理研究的电子加速器是脉冲式的。它们的有荷因数低,加速后的电子打在靶核上的时间仅占1%。为了克服符合实验中的高本底,这就要求很高的峰流,以便得到可观的发光度。这些加速器的能量一般都低于1GeV,在能量明显高于粒子物理加速器所用能量的情况下,已经完成了几次实验。对于实现核现象的目前理论描述适用范围的极限来说,这些装置已经足以胜任了。但是,要想把自旋结构研究的范围拓广到大

大超过现已达到的范围之外时,目前的装置就远远不能应付了。当前面临的一个新挑战,就是建造用于核物理研究的新型电子加速器,以便创造新理论,能够对核中的短程过程和长程过程都能给出统一的描述。

在入射电子能量低于2GeV时,不久就可用于高分辨实验,目的是研究核的多体问题和测量准粒子轨道的占有和形状。对于分辨重核的激发态而言,所需要的典型能量分辨约100KeV。利用这样的分辨,就可以在系统核研究中取得不少进展。在更高能量时,对于高分辨的要求明显降低。Bonn(EISA)、MIT-Bates (Cambridge, USA) 和NIKHEF (Amsterdam)的加速器,都较过去的装置更加复杂和高级。在几年之后,这些装置都将提供连续束流,并将进行符合实验。在MIT和NIKHEF可得到的流强将大大展宽直到能量为1GeV的电子散射实验。这些实验的目的集中在如何解决核子的、介子的和 Δ 同量异位素的多体物理学上。NIKHEF的UPDATE设计对现有Linac附加一个脉冲展宽环。无论在提取方式工作或是在内部气体靶方式工作时,该脉冲展宽环都能为实验提供800MeV的束流。在MIT-Bates正在建造的另一台装置,其设计与上面提到的类似,只不过能量稍高些(1GeV)。在Bonn的ELSA是台强度相对低的装置($<100nA$),但最适用于直到高达3GeV的光子实验。

两台新的连续束流的电子加速器将在最近几年建成,这就是在Mainz (MAMI B)的800MeV电子回旋加速器和在CEBAF (Newport News, Virginia, USA)的4GeV超导直线加速器。对于低于1GeV的光子和电子的实验来说,Mainz的设计是相当好的装置。CEBAF的设计的突出优点在于,直到4GeV时都能同时得到高强度的连续束流和高的能量分辨。这就能首次允许研究核子间短程相互作用的实质。在建造该加速器的同时,还酝酿设计着将要进行的崭新实验。CEBAF上进行的这些实验预计在1995年开

正在建造和计划中的用于核物理研究的电子加速器

| 装置 | 地 址 | 类 型 | 最大能 | 平均流强 | 有荷 | 进展情况 |
|-------------------|--------------------|---------------------|----------|---------------|---------|---------------|
| | | | 量 GeV | μA | 因数 % | |
| Darmstadt | W. Germany | recirc SC linac | 0.13 | 20 | 100 | 建造中 |
| Lebedev | Moscow, USSR | microtron | 0.14 | 100 | 100 | 建造中 |
| EROS | Saskatoon, Canada | linac/PSR | 0.28 | 76 | ~70 | 接近运行 |
| Update/ NIKHEF | Amsterdam, Neth | linac/PSR | 0.7 | 40 | >90 | 1989年开始 建造 |
| *MAMI | Mainz, W. Germany | cascaded microtron | 0.84 | 100 | 100 | 建造中 |
| *Bates/MIT | Middleton, MA, USA | linac/PSR | 1.0 | 50 | ~87 | 设计中 |
| LIS-B | Frascati, Italy | recirc SC linac | ~1.0 | 100 | 100 | 建造中 |
| ADONE | Frascati, Italy | synchrotron | 1.5 | 80 | 1—5 | 设计建造中 |
| ALS-11 | Saclay, France | recirc SC linac | 1.5—4 | 100 | 100 | 研究设计中 |
| *ELSA | Bonn, W. Germany | synchrotron/PSR | 2.0 | 0.2 | ~100 | |
| | | synchrotron/booster | 3.5 | 0.5 | 6—95 | 建成 |
| *CEBAF | Newport News, USA | recirc SC linac | 4.0 | 200 | 100 | 建造中 |
| Lebedev | Troitsk, USSR | cascaded polytron | 4.5 | 100—200 | 100 | 提出 |
| ARES | Frascati, Italy | recirc SC linac | 8.5 | 200 | 80% | 建造中 |

*可提供极化束流。

始。这个装置的总投资约2.65亿美元,它也是美国目前在核物理领域中投资最大的设备。

四、简短的展望

1. 实验前景

用高能电子研究核结构的前景显然是光明的。用于探索研究1 GeV区域的加速器,不久就可以得到了。利用Mainz和NIKHEF的装置,欧洲科学家在这个领域的研究将处于十分有利的地位。在2到4 GeV之间的区域,将会大大丰富多体物理学的知识,并且适于系统研究核子物理学、介子物理学和 Δ 同质异位素物理学。在这个能量区域,如果欧洲在最近的将来没有新的设计和建造计划问世,那末美国的CEBAF将明显处于主导和领先地位。因为通过(e, e' , pp)反应研究短程相互关系至少需要4 GeV,在此区域仍然存在严重问题。在超过10 GeV时就是夸克占优势的区域,尽管我们用粒子物理加速器能

够进行探索研究,在很多情况下还要和高能电子加速器相互补充才会事半功倍。在PEP的PEGASYS内靶装置允许高达15 GeV的能区,尽管它的有荷循环很低并且不能提供极化束流。这些装置至今都还没有制定进行符合实验的系统计划。

2. 理论展望

至于理论模型的前景,普遍的看法似乎是不再从核子的观点出发,目前已倾向从夸克自由度的观点出发去讨论问题。这是由于核子的合成情况造成的。核中强子相互作用的描述,在QCD框架中就能够初步做到。这是个难以克服的问题;核中夸克动力学的概念,只用现有的核数据还不能很好确定。为了在夸克水平上弄清楚核结构,就需要获取新的数据。高入射能量时的优点出现在 $E > 10 \text{ GeV}$ 的情况时,此时的实验解释变得容易些。这是因为SLAC实验已经表明,此时已经达到令人神往的散射区,并且确信必然是来自夸克的散射。

长期以来面临着另一个挑战,那就是寻找强子物理的初步描述。如果欧洲物理学家能够千方百计地致力于建造他们至今尚未开始设计的装置,那末他们才有可能为实现上述目标作出贡献。

目前国际核物理学界的同行,正在寄厚望于刚刚建成和正在建造中的加速器。他们热切希望能够在这些加速器上尽快开展工作,以使用先进的束流和设备为推动核物理学的进展作出独特的贡献。

参考文献

1. W. Panofsky, in Proceedings of the

14th International Conference on High Energy Physics (Vienna 1968)

2. J. Aubert et al., Nucl. Phys. B259 (1985) 189
3. B. Frois et al., Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 37 (1987) 133
4. B. Frois et al., Comments Nucl. Part. Phys. 18 (1989) 307
5. L. Frankfurt et al., Phys. Rep. 160 (1988)235
6. J. Ashman et al., Phys. Lett. B206 (1988)354