

核物理与加速器未来一瞥

颜家骏

摘要:核物理过去把核看作单核子壳层模型的简单图象,现在已经转向把核看作有限饱和多体系统。GeV 电子加速器和重离子碰撞机是能够进行此类研究的两种未来加速器类型。

一、引言

核物理研究的需要,推动了加速器的研制;而加速器的进展,又反过来推动了核物理研究。在过去的几十年里,为了探索物质的奥秘,核物理与加速器并肩战斗,相辅相成,互相推动与促进,都已取得了极大进展,现在又都进入了充满探索与期待并且最有挑战意味的新时期。

我们已经很好地研究和掌握了把核作为单核子壳层模型的简单图象。现在核物理学的重点已经转向把核看作是有限饱和多体系统。壳层模型的核自由度来自纯核子态,而夸克胶子自由度来自介子态和激发强子态。这就展览了核自由度,从而丰富了物理学。把核看作多体系统,就有可能揭示新的和难以捉摸的核物理现象。众所周知,核物理学已经把周期表中已知元素的名单推进到第109号元素,所研究的核类已经从低自旋态展览到高自旋态,从 β 稳定线附近核进展到远

β 稳定线核,从使用轻核到使用重核。重离子核物理的迅速兴起,已为核物理的进展开拓出美好的前景。尽管如此,核物理仍然从把核看作单核子壳层模型的框架中解脱出来,开始了把核看作多体系统的意味深长的转折。

为了推动未来核物理的进展,我们将需要新的加速器类型,并使用各种不同的和相互补充的探测研究,即电子和其它轻子、轻强子和重离子。作为长远计划的第一阶段,要建造4GeV高强度高有荷因数的电子加速器。这样的加速器,有一台称为4 GeV连续电子束加速器装置(CEBAF),已由美国东南部大学研究协作组(SURA)着手研制。

另外为了开创新研究领域,还计划建造超相对论重离子碰撞机。用它进行核的极端条件下的研究。布鲁克海文已计划建造每核子100GeV打100GeV的重离子碰撞机。劳伦兹伯克利和橡树岭实验室也已筹划对低能碰撞机进行改装。作为长远计划的是未来的轻强子装置,开始计划的有洛斯阿拉莫斯的高

能有足够的强度。

以上简述了会议讨论的主要科研课题,另外还有些课题,如 π 介子阈下产生和一些理论性的核质相变课题,即核质在压缩下,从费米气体相朝小液滴相过渡,并且在相图上还存在有气、液共存相等。

费米能区重离子是原子核的加热源、压力源;在其作用下,产生维系原子核下的最高温度与不破碎(散裂)下的最大压力。核质在这样的条件下,对其热力学与机械上的稳

定性及其限度的探讨,是有重要意义的。

会议主席在闭幕演说中,对正在建造中的中能重离子加速器,表示了良好的祝愿。这些加速器有:意大利的卡塔尼亚和加拿大的巧克河(均为串列+超导回旋)、美国密执安大学的K=800,日本理化所和中国兰州近代物理所。今后一、二年,这些加速器将陆续出束,这样,费米能区的原子核研究将在全世界开展起来。

强度质子加速器。布鲁克海文也计划提高AGS质子同步加速器的强度。

二、核物理的发展趋势

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。但是夸克模型认为，所有强子都是由夸克组成，核子和其它三夸克重子，以及夸克一反夸克对的介子。正如色动力学所描述的，强力最终来自带色胶子的交换。夸克胶子图象不只是深化了核的强子描述，还展现了激动人心的前景，那就是能够明确理解核中夸克和胶子的自由度。

和其它强相互作用系统一样，实际的内自由度描述核对空间坐标的依赖性。核壳层模型描述空间尺度约大于1fm的现象，也就是把核子作为各自独立的点核子，并且只讨论由它们之间的各个力独立产生的位垒中的集体运动。当用更高能量的探针观察更精细的空间尺度时，实质上展宽了的核子结构开始起作用。在能量超过几百MeV时，就必须考虑“强子”自由度，象各独立核子的共振激发态及介子激发。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。在理解这个能量级别的核方面，业已取得明显进展。例如，已经发现了介子交换流、被介子自由度携带的电磁流。这些都清楚地说明了强子自由度引起的效应和核物质状况的改变。

在更精细的尺度即小于核自身大小时，相应能量为GeV量级，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。在这个能量级别时的一个很有吸引力的问题是，研究从强子自由度到夸克胶子自由度的这个转变过程。强子自由度描述低能低动量核物理现象，而夸克胶子自由度描述高能高动量核物理现象。这是未来核物理研究的重大领域之一。

在这个能量级别上能够有所作为，揭示新的现象。第一个有希望的苗头，就是著名

的EMC效应，这是欧洲介子协作组(EMC)1983年发表的在CERN的测量结果，表明在核的和这些核内自由核子的动量分布间的不同。所作实验为高能介子的深度非弹性散射，数据表明核中夸克的动量分布向更低动量移动。这个现象乍看起来是出乎预料之外的；但实际上即可以用相邻核子的夸克间的重叠来解释，也可以用核子在核中所占的尺寸增加了来解释。只有积累更多的数据，并且对核本身的结构有了更加深刻的理解，才能真正完满地解释上述现象。至于谈到从介子—核子自由度到量子色动力学的转变过程这个根本问题，它确实是存在的，并且有助于解释EMC效应。核的功用就好象一个珍贵的实验室，能够用于研究将要面临的形形色色的课题。我们只要改变具体实验中的能量和所涉及的核，就能够改变反应产物的周围情况，从而得到我们所要研究的实验。

三、GeV电子加速器 与电磁探针

为了研究新的核自由度的现象有两个基本要求。首先要进行高精度实验，以便测定比较靠近基态的核态的波函数的性质。其次还要探测研究核物质的高激发态。对于结构研究来说，电磁探针是特别有用的。我们已经透彻理解了电子与核的基本相互作用，并且电子对核电荷密度、对流流和磁化强度都是灵敏的。电子散射、它的低发射束、高能量分辨的探测器、运动学适应性强，这些优点允许我们独立地改变能量转移和动量转移，使我们得到有关核结构和核子结构的最精确的知识。这类知识包括基态电荷分布、磁化强度、跃迁密度、单粒子的结构、集体态以及介子交换流的证据。

质子、反质子、 π 介子和k介子这些轻强子束，能够探测电子不能探测的结构的进一步情况，象强子密度分布和胶子含量。但是强子束的数据解释由于下述事实而复杂化

了,即我们对基本的强子相互作用的了解远不如电磁相互作用,这就使其应用受到很大限制。

如果能够探测到与散射电子符合的终态产物核,电子散射提供的有关核态和动力学的信息就会明显增加。例如,通过双核子撞击反应就能探测短程核子关联,而通过单核子撞击就能深入理解空穴态。但是符合实验要求单个事件在时间上的分离,因此在这样的实验中需要令人满意的高事件率,这就要求束流要连续到达(CW)而不是以短脉冲方式出现。

未来的核物理进展需要高有荷因数的加速器技术,这极大地鼓舞了核物理与加速器专家,在过去十年里共同致力于高强度、高有荷因数电子装置的建造。现有的电子束装置不能满足要求,有荷因数约为1%或更小。尽管低有荷因数装置已能进行部分重要的非符合实验,象核的深度非弹性散射在GeV CW装置没建成之前就已进行。但是它们不能提供在亚核子尺度时核结构的详细信息,而用CW高强度GeV电子加速器却可以提供。

这样的电子装置的最佳能量如何选择,却是个值得推敲的问题。例如,2GeV的能量相当于约0.1到0.2fm的空间分辨。只要达到这个能量的最低要求,在用符合实验探测核中强子自由度方面,就可以取得明显进展。在研究少核子系统和超核时,就能够选择2GeV,并能用于象宇称不守恒这样的基本对称性的重要检测。此外,2GeV时的空间尺度小于固有的核的尺度,量子色动力学相互作用的物理学在该能量时就已开始。超过1GeV激发能时,核子共振不再占支配地位,尖锐的核子共振变成了类点夸克组分的展宽共振。

我们已经知道,未来核物理在超过2GeV处有一个不明显的阈。增加束流能量,能够使设备的运动学适应性有重大改进。这样即能增加事件几率使实验得以顺利进行,又能

增加实验所能提供的信息。随着散射角的减小,本来很小的电磁过程的截面会明显增加。能量更高时,就能够在更小的电子散射角处产生给定的动量转移或者具有更大的截面,这就可能进行以前无法实现的实验。更小的散射角也允许更清楚地分辨系统的共振。一般说来,更高的能量允许探测更小的空间尺度和更大的能量丢失。认真权衡和考虑这些理由之后,现在已倾向于使用4GeV的CW电子加速器进行上述研究。

量子色动力学(QCD)在小距离尺度时,具有明显的“渐近”特性。在用4GeV电子研究时,在这个QCD相互作用范围内,对于某些具体终态的产生过程尚未达到“渐近”,此时也不能很好研究从强子自由度到夸克胶子自由度的转变区域以及夸克边缘区的反应机制。为了探索渐近QCD的简单性需要高得多的能量,从几十到几百GeV。不久就要在费米实验室提供800GeV介子束,而在斯坦福直线加速器提供20GeV电子束了。在用电磁探针研究核物理的设备方面,这是一个振奋人心的进展。

四、重离子碰撞

未来的核物理学研究,主要涉及到新的自由度、夸克组分和到QCD的转变等。我们已经讨论过的一种研究方法是,用GeV电子加速器借助电磁探针进行。下面讨论的另一种方法是,用超相对论重离子碰撞机借助超相对论重离子碰撞进行。例如当质心系能量高至100GeV/核子的U束碰撞时,就能探测核物质的高激发态,还能对用电子和轻强子探针所作的近基态研究进行补充。它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。这都是千载难逢的良机。它还打开了产生和研究“夸克胶子等离子体”之门,这是一种全新的物质状态,此时在这些单个的强子中的夸克和胶子都不再是有限的了。它还能

进行在单强子碰撞中可望而不可及的实验，那就是研究在距离大约超过核半径时在高激发态物质中的相互作用。

在低重子数密度和低温度时，物质由有限的强子组成，相关的自由度就是重子的和介子的。当能量密度增加时，温度或重子密度随之增加，开始达到一种夸克和胶子都变成无限多的状态。对这个过程的第一个简单解释就是，在核物质的展宽了的范围内沉积了大量的能量密度，然后就产生了足够的强子激发，并导致一些各自独立的强子袋充满空间，直到它们完全重叠合并成一个袋囊括整个空间，而夸克和胶子就在其中。

产生夸克胶子无限多状态所需要的能量密度，在数量级上要大于基态核的能量密度 $0.15\text{GeV}/\text{fm}^3$ 。已有理论估计出这种无限温度约为 200MeV ，这相当于能量密度约为 $1\text{GeV}/\text{fm}^3$ 。在温度为零时的无限密度估计约为正常核物质密度的 5 到 10 倍。为了达到足够的能量密度以便产生夸克胶子等离子体，需要这样的中心重离子碰撞，其质心系能量要比 $1\text{GeV}/\text{核子}$ 高很多。

重离子碰撞还能研究夸克组分、强相互作用的基本对称和近似精确对称（手征对称）。手征对称是由于矢量流守恒和轴向流部分守恒而产生的。它实质上意味着相互独立的右旋自旋费米子态和左旋自旋费米子态的相旋转，不能改变物理特性。对于强相互作用来说，这是个很好的近似。它在强子物质中的用处，类似于铁磁物质中的旋转对称。

相图中的夸克胶子等离子体区域、该区域的边界和手征对称性转变，所有这些都发生在重离子碰撞时。依据现在的知识判断，重离子的质心系能量必须超过 $30\text{GeV}/\text{核子}$ 时才有可能达到。甚至在质心系重离子能量低至 $1\text{GeV}/\text{核子}$ 时，都有可能在有限程度上达到上述区域。这就要求重离子有足够能量沉积在某个大的体积内，并且在碰撞体积内实现局部的热平衡。应当指出，这种可能性似乎有助于实现实验核物理学家多年的理

想。

在低能端，碰撞核能量为 3 到 $5\text{GeV}/\text{核子}$ ，这相当于相对固定靶 10 到 $30\text{GeV}/\text{核子}$ 。此时估计对于这些核子都有巨大的阻止本领。在该区域的对头碰中，两个核近似相互停止，同时产生密集火球。能量密度此时或许能达到几个 GeV/fm^3 ，数量级都超过了正常核的，并把重子密度压缩得超过 1fm^{-3} 。正常的大核其重子密度约为 0.16fm^{-3} 。这个区域通常称为核碎裂区。在该区的固定靶实验，计划 1986 年在 CERN 的超质子同步加速器上用 O^{16} 束流和在布鲁克海文的交变梯度同步加速器上用 S^{32} 束进行。但是，这些实验只是作为第一个探索阶段。因为炮弹是如此之小，以致不能指望得到突破性进展。究竟结果如何，核物理学界正拭目以待。

在超相对论重离子碰撞机中，重离子的质心系能量达到 30 到 $100\text{GeV}/\text{核子}$ 。由于核穿透性的结果，两个核相互“阻止”变成高激发的，并且留下的真空处于非常激发态。这就是质心系框架中小纵向动量的“中心区域”。在这样的碰撞之后，表明有两个很热的经过压缩的并作为碎片的核，它们以高的纵向速度离开碰撞地点。相空间的这些“碎裂区域”包含原始核的纯重子密度。

在中心“火球”中，重子数目近似等于反重子数目。在低质心动量的中心相空间区域的物质是刚产生的。它通过夸克胶子自由度的广泛激发而产生，有很高的能量密度但是纯重子密度却相当低。根据现在的估计，激发的中心区通过分离的碎裂核而变成局部热平衡留了下来，并以夸克胶子等离子体的形式出现。这些物质在碰撞后的系统扩展中冷却，同时夸克变成有限的，最终出现了自由射出的普通的强子，大部分是 π 介子。

在更低能量的碰撞中，两个碎裂区域能够指望用于探测很高重子密度的区域，并且有可能通过跃迁变成无限夸克的物质。一般说来，更高能碰撞能够探测相图，并且在重子密度和激发能都很宽的范围均能做到。

五、重离子碰撞机

在选择超相对论重离子碰撞机的一般参数时，应当考虑下列几个因素。在重离子碰撞中的中心相空间区域，应当有小的纯重子密度，以便在超过约30GeV/核子时就能进入。能量越高，则能量密度与能够达到的重子密度之比就越大。在能量超过约50GeV时，应当能够达到相图的一个大的区域。一个感兴趣的指标是在甚至更高能量时，产生强子喷射和研究它们通过核物质传播的可能性。把CERN的较低能和较高能基本粒子碰撞机的数据进行比较，可以看出随着能量的增加喷射产生变得越来越明显了。为了使重离子碰撞机有足够的动力学范围，布鲁克海文和CERN所用的方法是通过可调能量来适应固定靶实验的情况。

重离子碰撞机至关重要的是，能够加速从最轻离子（质子和 α 粒子）一直到很重的离子，并且允许不同质量的离子间进行碰撞。它在质量数和能量这二者增加时，都能进行系统研究，以便寻找具有可能的相变和其它现象的结构何时开始。除了软的质量数相关性之外，还发现了与QCD红外特性有关的强的质量数相关性。这就要求能够在大范围内改变所用核的尺度，以便有可能很好地研究和处理这类效应。

重离子的对头碰中每事件能够产生约一千个粒子。但是重离子碰撞机所要求的离子束对撞时的亮度为 10^{26} 事件/厘米²·秒。按高能物理的标准来看这个值不高，这相当于约每秒产生一个感兴趣的事件。必须指出，在干涉量度学实验和稀有过程研究中，希望有较高些的亮度。

布鲁克海文最近已提出建造相对论重离子碰撞机（RHIC）。它能加速从很轻的元素直到Au，而Au束的能量约为10到100GeV/核子。对于Au打Au最重的碰撞来说，随束流能量的增加其亮度约从 10^{26} 到 10^{27} 事件/厘

米²·秒。不同质量的束将具有相同的最大能量/质子，这就是说最大能量/核子随质量数的减少而增加，对于质子束达到约250GeV的极大值。应当记住，在把离子—离子碰撞和核子—离子碰撞进行比较时，必须用质子束。预计布鲁克海文的RHIC在九十年代初就可建成，并进行首次相对论重离子碰撞研究。

SURA已着手研制4GeV高强度高有荷因数电子装置（CEBAF）。我们必然已经想到只有用连续束工作才能进行符合实验和怎样选择束能量。对于多用户使用来说，最重要的是束流强度要高，约为几百mA CW，这就允许多次提取束。它能提供1.2 μ s电子脉冲，其能量为0.5到4GeV，重复频率为1kHz，单峰输出流强为200mA。由拉长器环在1ms范围内提取出的束流脉冲，就能产生平均流强240 μ A和能量分辨好于千分之一的平稳束流。

六、回顾与展望

核物理学在几十年的漫长历程中，与加速器技术息息相关，共同取得了巨大成就。但是在探索物质奥秘的征途上，尽管对作为单核子壳层的核进行了深入研究，却面临着日益严重的挑战。人们发现，只用单核子壳层的理论框架，进行所谓的修补完善，已经不能完美解释形形色色的现象。只有从单纯的陈旧框架中解脱出来，把核作为多体系统的观点也给予考虑，才能使核物理学继续迅速发展。

当人们有了上述考虑之后，就要慎重寻找能够进行新形势下核物理研究的加速器新类型。首先想到的当然是作为电磁探针的电子，因为人们对电子的使用早已是轻车熟路。最终采用了高强度高有荷因数的GeV电子加速器。

随着重离子核物理的迅速兴起，人们很快认识到它的巨大潜力。那就是使用重离子

碰撞，能够揭示和研究过去闻所未闻的现象。当用相对论重离子碰撞时，同样能够深入研究作为多体系统的核，于是它成了新形势下的又一种加速器新类型，也就是超相对论重离子碰撞机。

除了上面的两种主要类型之外，还有一种类型值得一提，那就是洛斯阿拉莫斯的轻强子装置LAMPF II。它从现在的LAMPF 800MeV直线加速器把质子射入6GeV增压环，然后把提取出的质子束经分离注入45 GeV主同步加速器环，于是就同时得到GeV能量的中微子束。另外还可以产生次级k介子、 π 介子和反质子束。

已经提出的加速器装置都有一个共同的目的，那就是理解核中的全部自由度和所有物理现象。尽管它们在结构和原理上都十分不同，仍然能够在上述基本前提一致的情况下，相互取长补短，共同发展。但是它们又基本上是各自独立和自成体系的。

我们完全有理由相信，随着新类型加速

器的陆续建成，随着新类型实验的不断开展，随着核多体系统的理论进展，核物理学研究在未来的十年里，必然会呈现出光辉的前景并取得实质性进展。

参 考 文 献

1. J. J. Aubert et al., Phys. Lett. 123B (1983)275
2. A. Bodek et al., Phys. Rev. Lett. 51 (1983)534
3. T. Cowan et al., Phys. Rev. Lett. 54 (1985)1761
4. J. Kogut et al., Phys. Rev. Lett. 53 (1984)644
5. H. Wegner, Nucl. Phys. A 418(1984)
6. H. Bokemeyer et al., GSI Annual Scientific Report (1984) page 177
7. M. I. Sobel et al., Nucl. Phys. A251 (1975)502
8. W. Lichten et al., Phys. Rev. Lett. 54(1985)781
9. G. Fraser, CERN Courier. May 1986.