

原子与原子核的新形态——

# 介子原子和介子核

王景丹 钟显辉 宁平治

普通原子核由质子和中子组成。随着实验和理论研究的发展,人们认识到还存在着另外一类奇特的原子和原子核——介子原子和介子核。这些新形态的原子和原子核在自然界中是很难找到的,原因是它们的寿命很短。只有在实验室中才能观测到这些奇特的原子和原子核,所以一直不太被人们了解。然而近年来,新的实验现象和新的理论分析使人们对介子原子和介子核有了新的认识。

我们在介绍介子原子和介子核之前,首先对介子作一个简单的介绍。介子跟核子一样都是参与强相互作用的粒子,各种介子都是由一个正夸克和一个反夸克组成的两夸克系统。不同的介子由不同的夸克组成。到目前为止,我们认识到的介子主要有 $\pi$ 、 $K$ 、 $\eta$ 、 $\rho$ 、 $\omega$ 、 $\sigma$ 、 $\phi$ 等。介子原子就是一个带负电的介子进入原子外围轨道,通过放出X射线退激发进入一系列较低能级,最终介子落入原子核,被原子核吸收。此时介子的地位有点像原子中的电子,只是介子的质量比电子大得多,因而介子轨道半径比电子轨道半径小得多,介子与核的表面靠得很近,除了库仑作用外,它们还感受到与核之间的强相互作用。介子核就是介子已经进入到了原子核的内部,在与核的强相互作用下形成的一种深束缚态。

## 介子原子

迄今发现的介子原子有两类,一类是负 $\pi$ 介子与原子核形成的 $\pi$ 原子,另外一类是负 $K$ 介子与原子核形成的 $K$ 原子。介子原子对我们了解介子与原

子核的强相互作用有着非常关键的意义。我们通过实验测量出由于强相互作用带来的介子原子的能级移动(相对于无强相互作用时的能级)和能级宽度(核吸收的量度)这两个非常重要的物理量,就可以知道介子与原子核之间强相互作用的信息,再通过拟合这些实验上测得的数据信息,我们就可以提取到描述介子与原子核间强相互作用的势场。探测来自介子原子的X射线的实验装置通常由以下三部分组成:第一部分是专门产生相应的介子束流,第二部分是一个识别和产生所需要研究的介子原子的系统;第三部分是一个精确测量来自靶上的X射线的强度、能量和分布的系统。

根据实验测量结果, $\pi$ 原子的能移和宽度在几个到几十个keV范围内,而 $K$ 原子的能移和宽度大概只有十几到几百个电子伏特。这些能量的量级相对于原子核的激发能量是非常小的,与原子的电子激发相当。说明介子在原子核外围感受到了强相互作用,但是这种作用强度非常小,与库仑作用强度相当,介子在原子核表面外侧,只是一种势阱较浅的束缚。

最简单的 $K$ 原子是 $K^-$ 氢原子,它由一个质子和一个被库仑力束缚在其周围的 $K^-$ 介子组成。研究 $K^-$ 氢原子对了解低能下 $K$ 介子与核子(KN)的强相互作用有十分重要的意义。在过去实验基础上,近来利用新的实验技术对 $K^-$ 氢原子的X射线进行了重新测量,得到了不同于以往的强相互作用能级移动

指出并承认这一事实并不够;更加重要的是应该分析:以相对论体系和量子论体系为代表的当代物理学应该如何进化、向什么方向进化?我们应该如何追求、向什么方向追求?

回顾相对论体系的建立、发展和今天面临的问题,应该注意到哲学观点和科学思想之间的关系。对此,爱因斯坦发表过精辟的见解:“哲学的推论必须以科学的成果为基础。”而“哲学又往往促使科学思想进一步向前发展,它能够在许多可行的路线中间为科学指引一条(最恰当的)路线。”(引自《物理学的

进化》)。爱因斯坦在建立相对论体系的过程中,始终贯彻着这一观点,这无疑是爱因斯坦创造奇迹的重要的主观原因之一。

在纪念爱因斯坦奇迹的今天,发扬科学精神和社会责任感,独立思考、不畏权威、善于学习、努力工作、注重方法、不尚空谈,直面科学面临的挑战,为人类社会进步做出贡献;这或许是这位伟人成功的启示。与此同时,爱因斯坦关于哲学观点和科学思想之间的关系的思想和实践,同样指引着他的后继者们。

(中国科学院理论物理所 100080)

现代物理知识

和宽度数据, 对于进一步研究 KN 相互作用提供了较可靠的数据。迄今对能移的计算很多, 但结果很不一致, 连正负号都不一致(见图 1, 横坐标是能移, 纵坐标是能级宽度, 负值区对应排斥, 正值区对应吸引, 英文字母是实验室名称)。新的实验结果解决了长期以来的 K- 氢原子之谜。对于 1s 轨道具体实验数据(1998)为: 能移  $\Delta E_k = -323 \pm 63 \pm 1eV$ , 宽度  $\Gamma_k = 407 \pm 208 \pm 100eV$ 。这些数据为检验理论模型提供了新的依据。

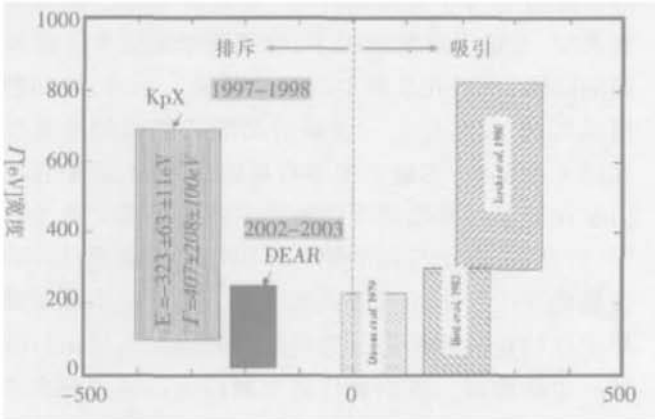


图 1 K- 氢原子的基态能移和宽度的各家结果, 矩形区域为各家实验的范围

### 介子原子的深束缚态

$\pi$  原子、K 原子的性质在理论和实验上已经研究得相当清楚了, 那么  $\pi$  介子、K 介子是否可以存在于核的内部, 如果存在, 它们又有什么特殊的行为呢? 长期以来, 人们只认识到核内有虚  $\pi$  介子, 它们在原子核中是传递核力的重要角色; 并没有发现实的  $\pi$  介子(可以形成一个窄宽度的束缚态)在原子核中的任何信息。 $\pi$  介子到底能够以何种形式存在于原子核中, 存在的寿命有多长, 一直是核物理学家和粒子物理学家非常感兴趣的问题。

1988 年, 物理学家预言在中重核中可能存在负  $\pi$  介子的深束缚态。他们计算了负  $\pi$  介子在  $^{90}\text{Zr}$ 、 $^{208}\text{Pb}$  核中的束缚能, 计算结果发现最低能级 1s 态的束缚能分别为 2.97MeV 和 6.96MeV, 能级的宽度大约比束缚能小一个数量级, 并且 1s 态与上一能级间隔足够大(见图 2)。

这样的  $\pi$  介子束缚态在实验上应是可以探测到的。他们给出的理论解释是: 除了吸引的库仑作用外, 负  $\pi$  介子与原子核的 s 波强相互作用是排斥的, 这种排斥作用使得  $\pi$  介子的分布很大程度上被

推到原子核外, 这样负  $\pi$  介子被原子核吸收的可能性大大减少, 从而压低了  $\pi$  介子原子深束缚态的能级宽度。

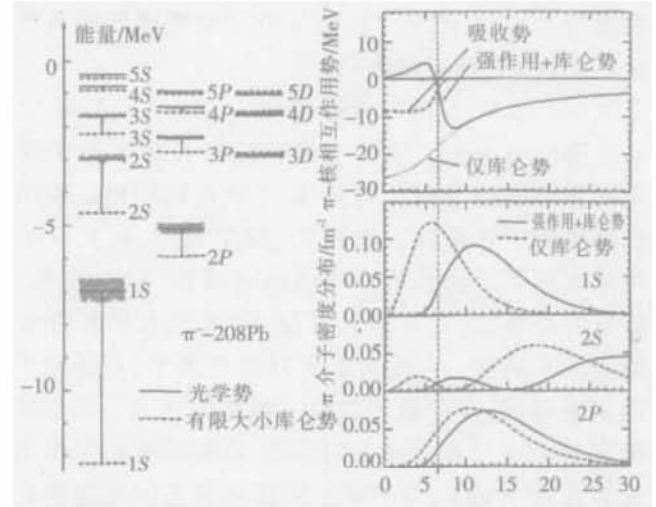


图 2 理论计算的  $\pi$  介子在  $^{208}\text{Pb}$  势阱中的能级图(左)和  $\pi$ - $^{208}\text{Pb}$  相互作用势以及  $\pi$  介子处于 1s 态, 2s 态和 2p 态的几率密度分布(右)

10 多年来实验家们一直致力于寻找深束缚态的负  $\pi$  介子原子, 但用通常方法一直未能实现。近几年在实验上已经取得了突破。例如最近德国的 S160 合作组利用 300MeV/u 的氦核入射束, 在  $^{208}\text{Pb}$  ( $d, ^3\text{He}$ ) 转移反应中找到了  $\pi$  介子原子深束缚态的 2p 态的信号(见图 3)。

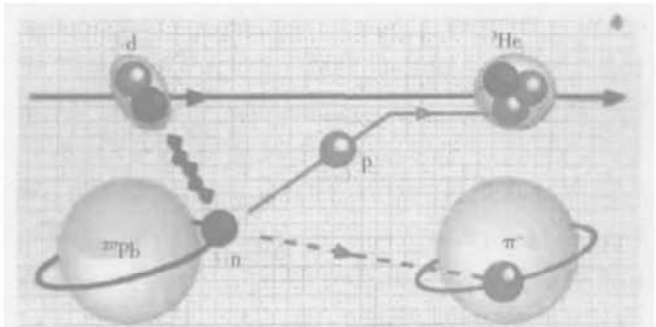


图 3 产生  $\pi$  介子深束缚态的核反应过程

此后不久, 日本和德国的科学家又利用 600MeV/u 的氦核入射束在在  $^{208}\text{Pb}(d, ^3\text{He})$  转移反应中找到了  $\pi$  介子原子深束缚态的 1s 态的信号。正如理论预言的那样, 一些中重核的深束缚  $\pi$  介子原子有可能处于原子核的分立能级上, 条件是激发能刚好低于  $\pi$  介子发射的阈能。对核相互作用势的理论计算表明, 重核的强库仑势(吸引)与强相互作用(排斥)的总效果能够在核表面外侧附近形成浅的核势阱(吸引)。这将为我们研究原子核结构和强相互

作用提供新的信息,更进一步的实验和理论研究仍在进行中。 $\pi$ 介子原子深束缚态的成功发现,为我们研究 $\pi$ 介子与原子核的强相互作用提供了方便的新途径。人们自然会问,负K介子也能够形成与负 $\pi$ 介子类似的深束缚态吗?

### 介子核

到前面为止,实验上没有找到K介子原子深束缚态的确切证据。然而,K介子与核的相互作用已经得到了非常深入的研究。结果表明,负K介子可能在原子核内部形成很强的束缚态,称为K核。K核的束缚能(几十到上百MeV)远远大于K介子原子的束缚能。在此有必要对介子原子,介子原子的深束缚态,介子核三者做一粗略的划分。从束缚能来看,介子原子中的介子感受到的强相互作用最多几百个keV,介子原子的深束缚态的束缚能在几个MeV范围内,而介子核比如K核的束缚能达到了几十到上百MeV。就介子所处的位置来看,介子原子中的介子处在原子核的外围,与核没有接触;介子原子的深束缚态中的介子更靠近原子核,有处在原子核表层的几率;介子核中的介子处于原子核内部。

K核研究还是最近几年的事情。2001年,科学家们理论上预言负K介子可能在 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^8\text{Be}$ 中形成深束缚的介子核,基态束缚能估算可分别达到108MeV、86MeV、113MeV,它们的宽度估算结果分别是20MeV、34MeV和38MeV。这么强的束缚能,可能在核内部形成一种非寻常的致密核物质。这一报道,立刻引起了许多科学家的兴趣,他们用其他理论同样预言了K核的存在,并且会在核内部形成5到8倍正常核物质密度的高密常温的核物质。如果得到实验证实,这将是自有史以来首次发现的在常温条件下的极高密度核物质。

这方面的实验探索正在进行。最近的实验通过 ${}^4\text{He}$ 俘获负K介子发现了一个质量为3115MeV的三重子共振峰 $S^0(3115)$ ,极有可能是一个深束缚的负K介子核(K-pnn)。但是,根据理论物理学家的最初预言还存在一个不同于 $S^0(3115)$ 的共振峰,最新的实验的确找到了这方面的信号——又一个奇特的三重子共振峰 $S^+(3140)$ ,很可能就是理论上预言的深束缚K核 ${}^3\text{HeK}^-$ 。可是,要在理论上确认 $S^0(3115)$ 、 $S^+(3140)$ 是深束缚K核,还存在着若干困惑,比如,这样高的中心核密度(约10倍

于正常核密度)很难令人相信仅仅在强子层次上的核理论仍然实用。更深入的实验和理论研究正在进行着。如果 $S^0(3115)$ 、 $S^+(3140)$ 果真是深束缚K核,这就意味着形成了一种高密度的常温核物质,这将为在实验室中研究高密核物质开辟一个全新的领域。

除了 $\pi$ 介子、K介子与核的相互作用的研究之外,科学家们一直不停地在探索着其他介子与原子核的相互作用。西班牙核物理学家预言,在原子核内部可能有 $\eta$ 介子束缚态存在,也就是 $\eta$ 核。但是研究表明,在绝大多数情况下,能级的半宽度大于能级间的间隔,所以在实验上很难观测到。不过,他们指出最低的1s态与上一能级的间隔和能级的半宽度在同一个量级,实验上还是有可能观测到的。近来有关 $\rho$ 、 $\phi$ 、 $\sigma$ 介子在核物质中的性质的报道不断。介子原子,介子核,介子与核的相互作用性质的研究已经成为核物理中一个相当活跃的领域。总之,这些原子或原子核结构的新形态,为我们研究强相互作用打开了一个新窗口,我们通过这个窗口可以认识到有关强相互作用的新信息,尤其是一些以前只能在核天体中才能找得到的信息,比如,常温下高密度核物质的性质。这些对我们研究早期宇宙,研究极端条件下的核性质,以及研究核物质由强子相到夸克相的相变等都是很有意义的。

(天津南开大学物理学院 300071)

### 封面照片说明

伽利略计划(欧洲全球导航卫星计划)是欧盟为打破美国GPS在全球的垄断而与欧空局联合研制的民用导航卫星系统。伽利略系统由分布在3个轨道面上的30颗卫星组成,每个轨道面上有10颗卫星,轨道高度23616千米,轨道面倾角56度,运行周期14小时04分,并能与GPS完全兼容。

2004年10月9日,国家遥感中心与伽利略联合体在北京签署了《中国国家遥感中心和伽利略联合执行体关于伽利略计划合作协议》。协议确定了中国参加伽利略计划管理、承担伽利略计划开发阶段的项目和提供资金等一系列具体的权利及义务,标志着中国加入伽利略计划进入实质性阶段。

目前,除中国外印度与以色列也参加了这个计划。

(李博文)

现代物理知识