

谈谈核物理学

石 崇 仁

核物理是以原子核为对象研究物质性质的一门科学,它研究核内组分的运动、组分间的相互作用及核间碰撞规律。原子核是一个有限多体、强相互作用的量子体系,决定了它的复杂性,此外,核本身具有许多特点,例如高密度强束缚,使它成为精确检验和发展标准模型的良好“实验室”,确切地说,现代核物理是强子物理。核物理也是一门与其它科学有着紧密联系和广泛应用的科学。

一、核物理学的进化

人们对原子核的认识是从外向内逐层深入的,研究范围从一般到特殊、从正常到奇异逐步扩大,它的发展分别体现了对物质的组分及相互作用力两个方面认识的统一。核物理学的每一发展阶段都与技术进步、特别是与加速器的发展有关。

(1) 原子核构成的四个层次

1911年卢瑟福用 α 粒子轰击金箔,发现了它的后角散射,证明了原子内存在一个很小很重带正电荷的核心,称为原子核。

原子核是由什么组成的?在相当长的时间里并不清楚,直到1932年英国人查德维克发现中子,随后海森堡和伊凡宁科各自提出了原子核由无结构的中子和质子组成,中子和质子统称核子,核子间是短程强相互作用力的假说。这一假说奠定了低能核物理的基础,从此开始了一门新的科学。

1935年汤川秀树提出了强相互作用是靠介子传递的理论,1947年鲍威尔从实验上证实了核力的传播子 π 介子的存在。1952年费米用195 MeV的 π 介子轰击质子,发现了核子最低的激发态 Δ 。它们说明了原子核内有 π 介子,核子不是无结构的基本粒子。现在,人们可以认为原子核的组分是核子、介子及核子的激发态。通常称参与强相互作用的粒子,如核子、介子等为强子,在这个层次上,原子核是由强子组成的。

1964年盖尔曼提出了强子由夸克组成,其中核子由三个夸克(qqq)、介子由正反两个夸克(q \bar{q})组成的假说,统一了构成强子的组分。不久,美国斯坦福直线加速器中心(SLAC)用25 GeV电子的深度非弹性散射,一个类似卢瑟福 α 粒子散射的实验,证实了核子内存在夸克。1973年人们又提出了描写夸克间强相互作用的量子色动力学(QCD)。至此,原子核是由夸克及色力的传播子胶子组成。

1911年以来,人们对原子核组成的认识经历了四个层次:原子核、核子、强子和夸克。它们的空间范围分别为: 10^{-11} 、 10^{-13} 、 10^{-13} 和 $<10^{-18}$ cm。它们也不同于自由的核子、强子和夸克,而是有效的核子、强子和夸克,称它们为组分。

(2) 夸克和色力

夸克是自旋为 $1/2$ 的费米子,它带有分数电荷 $2/3$ 或 $-1/3$,还带有色荷。夸克的最大特点是被禁闭在强子中,没有自由的夸克存在。夸克间的强相互作用是借胶子传递的色力,其特点是:在 <0.2 fm的短距离(即渐近自由区)内,夸克间的相互作用力很弱,可用微扰QCD理论处理;在 $0.3-1.0$ fm(非微扰区),夸克间距越大,相互作用越强,这一点与强子间的强相互作用、电磁相互作用及引力都不相同;在 >1.0 fm(长距离区),夸克将强子化。

(3) 核物理实验

核物理实验由四部分组成:探针、靶子、探测器及电子学线路和计算机。加速器用来加速带电的初级离子束,如电子、质子及各种重离子,及由初级离子束产生的次级粒子,如中子、 π 介子、反质子、 K 介子、中微子及各种放射性粒子等等。用于研究原子核的初、次级粒子也称为探针,一般初级离子束强度高、品质好,次级束则不然。由于电子是初级束又具有许多优点,它是一个极好的探针。靶子,由待研究的原子核组成,是探针轰击的目标;探测器测量探针与靶核相互作用产生的粒子,并转换它们成电信号;电子学线路和计算机用于处理和记录电信号,得到粒子在探测器内产生的能量、时间;探测器测量探针与靶核相互作用产生的粒子,并把它们转换成电信号;电子学线路和计算机用于处理和记录电信号,得到粒子在探测器内产生的能量、时间、种类、弹道和产生点等等。极化束、极化靶和出射粒子极化测量对于了解相互作用力和结构是重要的。为了弄清原子核结构,需要多种不同性质的探针。

二、核物理研究面临的困难和新机遇

由于强相互作用力不清楚,有限多体问题没有合适的处理方法,所以核物理学没有象电动力学那样可解的方程式。事实上,原子核又呈现出许多简单对称的性质。为此,各种简化核力和自由度使方程可解的方法(称之为模型)出现了。例如,1949年迈耶和詹森的壳模型,只考虑强相互作用的平均场部分,将有限多体变为一体问题。现在核物理仍然没有一个系统、完善的理论能说明各方面的性质。

目前,在低能核物理的范畴上,人们需要大量和系统的与核温度、角动量及同位旋量子数有关的信息,从而全面了解有效相互作用力、剩余相互作用力及有限多体结构同最后一个核子填充轨道和同位旋量子数的关系。在夸克和胶子的层次上,统一地了解强子和原子核是如何由它们构成的,四个层次又是如何转换的,强

相互作用是如何来自色力的等等。核物理面临新的发展和研究机遇,主要集中于四个方面:

(1) 核内的夸克自由度

在高密度、强束缚的原子核内,即核介质内,可能出现夸克渗透、多夸克态、核子肿胀、变形及激发等等。它们反映出 QCD 及部分去禁闭性质,欧洲 μ 子联合体 EMC 用 μ 子在氦和铁核的散射实验中发现了自由核子内的夸克动量分布不同于核内的,称为 EMC 效应,可解释为,在核介质内夸克禁闭不那么强。

原子核可被视为夸克源,利用电子散射传递给夸克很高能量,使它冲出核原子,研究夸克在不同大小的原子核内及外部的强子化,当电子转移高动量给核子,可以产生纯的三个夸克结构的“小强子”,它不容易被原子核吸收,称为色透明性,对于检验 QCD 理论十分重要。

除电子是研究夸克自由度的良好探针外,还有 K 介子及反质子等。

(2) 新的物质形态—夸克胶子等离子体(QGP)

天体物理认为在大爆炸的瞬间 10^{-22} 秒内形成 QGP,在以后的几微秒内强子化,形成原子核。QCD 也预言了原子核在高温和高密度下形成 QGP。长期以来,人们研究了在正常核温度和核密度周围的性质,目前,在实验室内产生夸克胶子等离子体是可能的,从而研究夸克去禁闭及强子化和天体演化过程。QGP 的独特信号是什么?至今不能说是确定了,它仍然是值得深入研究的。QGP 可通过两个速度极高的重核碰撞来实现,在中子星的内部可能存在 QGP。

(3) K 介子核物理

无论低能还是中能核物理,参与作用的都是以上、下夸克为基本成份,显然它们只能反映出原子核与上、下夸克有关的性质。

质量为 494 MeV、寿命为 1.24×10^{-8} 秒的 K 介子含有一个奇异夸克 (s)。三种 K 介子的夸克组成为: $K^+(u\bar{s})$ 、 $K^0(d\bar{s})$ 及 $K^-(\bar{u}s)$ 。如果用 K 介子做探针,就能得到与奇异夸克有关的性质。同时, K 介子具有许多新奇的特性: (1) K^0 介子衰变中,时间反演不守恒,即 CP 不守恒; (2) K^+ 介子与中子相互作用可产生超子 Λ 或 Σ , 形成超核。从而可研究核内夸克是否去禁闭; (3) K^+ 在核物质内有很长的自由程,约 7 fm, 可以研究核内部性质; (4) K^- 在核内自由程短,约 1 fm, 可以研究核表面的性质,与 K^+ 互补; (5) 理论上预言的含有 6 个夸克的 H 粒子可以通过 (K^+ , K^+) 交换反应得到; (6) 稀有衰变事件 $K^+ \rightarrow \pi^+ + \nu + \bar{\nu}$ 对检验和发展标准模型是灵敏的。

(4) 放射性核束核物理

过去,人们一直利用地球上存在的稳定核作炮弹轰击另一个稳定的靶核,研究核结构及其碰撞规律。从稳定核间的碰撞得到的规律是比较正常的,或者说是

不全面的,基于这些信息的理论也不可能充分、全面地反映强相互作用的性质及核多体的系统行为。

理论预言有 8000 多种寿命长于微秒的原子核,地球上存在的稳定核大约有 300 种,人工已经合成 2600 种,显然人工合成的原子核种类繁多,更重要的是它们具有许多特殊的性质,例如,最后一个或几个核束缚较弱,并可占据特殊的量子轨道;不寻常的中子与质子数目比 (N/Z), 即不寻常的同位旋量子数;高 Q 值;奇异变形;中子晕……等。如果用人工合成的原子核做炮弹轰击稳定的靶核,必然得到稳定的弹靶组合得不到的原子核,将为天体物理的研究提供能量的产生、核素的生成和天体时间的标度等重要数据。

三、新一代大型加速器

这些新的研究机遇能实现的关键是技术的进步,例如,超导在加速器上的广泛使用、电子冷却束流技术、射频四极预加速腔及各种先进的离子源等等,它们为新一代高能、强流、连续束加速器提供了可能性,目前,国际上正在建造或筹建下列三种大型的加速器:

(1) 4 GeV 连续束电子加速器(CEBAF)

1987 年,美国 Virginia 的 Southeastern 大学建造一台连续波 (CW)、0.5—4 GeV、流强为 200 μ A、电子极化大于 0.4 的电子直线加速器,简称 CEBAF。预计 1994 年运行,1996 年达到指标。加速器由两个 0.4 GeV 的超导直线构成,其核心部件是一组超导射频腔,每米提高电子能量 5 MeV,在液态氮 2K 温度下工作,电子在加速器内循环 5 圈后能量达到 4 GeV。特点是 100% 占空因子,即连续束流,从而可开展遍举和反应平面外的测量工作。极化靶和极化束,以及反冲质子极化测量技术受到了重视。欧洲打算建一台 15 GeV 超导连续束电子直线加速器 (EEF),主要用于研究核内的夸克自由度。美国的 Bates、荷兰的 NIKHEF 和德国 Mainz 都实现了 1 GeV 连续束电子加速器。

(2) 相对论重离子对撞机

1991 年美国布鲁海文实验室 (BNL) 开始兴建 100 GeV/A 的重离子对撞机,它由下面几部分组成:首先在串列加速器产生重离子,经 550 m 的输运注入同步增强器,提高重离子能量,使核外电子绝大部分被剥离,例如将 Au 原子的 79 个电子剥离 77 个后注入可变梯度同步加速器 (AGS),使能量达到 14.6 GeV/A,核外所有电子被剥离,最后注入相对论重离子对撞机 (RHIC)。RHIC 由间距 90 cm 的两个超导磁环组成,磁场强度为 3.5 T,重离子在环内被加速、储存及碰撞,环的周长为 3.8 km,束流填充时间大约为 1 分钟,每环内离子强度为 10^{11} ,在环内经 60 秒加速达到最高能量,离子在环内寿命达 11 小时,一天填充两次即可,有六个碰撞点,三个用于实验。欧洲 CERN 计划



UFO 与飞碟的困惑

谈到自然之谜时，没有一个问题像不明飞行物(UFO)或飞碟引起人们那么多的议论了。早在1878年1月，美国得克萨斯州的一位名叫马丁的农民在田间劳动时，忽然看到天空中有一个圆形物体在飞行，他感到非常惊奇。当时美国有150家报纸争相报道马丁的发现，这是人类历史上最早见诸报端的不明飞行物的报道。不明飞行物的英文名称为“Unidentified Flying Object”，其缩写为“UFO”。从那时以来，UFO常常指的是出现在天空或地表附近的一种奇异的、来历不明的发光飞行物体。

1947年6月24日，美国飞行员凯尼恩·阿诺德在驾驶飞机执行一项救难任务时，发现了一种奇怪的UFO。那是在当天下午3点左右，他飞行到罗切斯山脉附近，在3500米的空中寻找一架失事的飞机。突然，阿诺德发现机舷旁亮起一道闪光！他立刻在空中来了一个大转弯，以便寻找闪光究竟来自何处。结果，这位富有多年飞行经验的驾驶员发现，有9个闪闪发光的耀眼物体排成梯形，从他的飞机前方由北向南飞去。“每个飞行物都跳跃似地前进，就像水上打漂的碟子”，“估计它们的半径为15米左右”。阿诺德事后向人们这样描述。他当时根据地面背景物作了三角测量，很快计算出发光体飞行速度——每小时达1900千米以上！当报纸上刊载这一消息时，记者们采用了“Flying Saucers”（飞碟）一词。科学家们认为飞碟的飞行速度快得令人不可思议，因为当时尚未发明超音速飞机。

后来，类似飞碟的报道不断出现，有时飞碟竟被人们作为不明飞行物(UFO)的代名词。几十年来，各种各样的发现UFO的报告接二连三地递向警察局、空军部、新闻机构及科学家们的办公室。据统计，40

探索地外智慧生命(五)

· 李 良 ·

多年来世界各国 UFO 目击者的报案总数已超过 30000 起。究竟什么属于 UFO 现象呢？据美国空军部 1954 年的一份情报文献所载，“UFO 是指空中一切这样的物体：其性能、空气动力学特征和某些特殊的部件不同于目前为人所知的各种类型的飞机或导弹，或不能被肯定为常见物体(如气球、星体、鸟群等)的东西”。

目击者所描述的 UFO 形状可谓五花八门，颜色瑰丽多彩，飞行神速诡秘，有的竟能使正常飞行的飞机发动机熄火、电流中断、电讯紊乱。有时在机场雷达萤光屏上出现几个到二十几个 UFO，有的时速高达 3700 千米！还有人说曾被来自外星的 UFO 掳去又放了出来……。

不明飞行物真相如何？

在 UFO 目击者中，有飞行员、陆军士兵、青年学生、工人、农民等。除了平民百姓以外，也有一些权威人士或科学家，例如冥王星的发现者汤博教授、美国总统卡特、里根等。说到这里，也许人们要问，UFO 的真相如何呢？为了解开 UFO 之谜，美国空军从 1948 年起执行了著名的“蓝皮书计划”，该计划在 1969 年宣告停止。这 22 年中共收到约 12600 件目击报告，其中 12000 件报告所述的 UFO，当局均以已知物体作出了解释，例如气球、飞机、流星、云彩、鸟、人造天体及光线反射等等。但是对于另外的 585 个 UFO 事件却难以使用一般的物理及大气现象来说明。

1968 年，由美国空军倡议，在美国科罗拉多州立大学开展了 UFO 学术研讨，几十位专家学者参加了这一工作，美国著名的物理学家康顿博士主持领导了学术研讨活动。最后，他们撰写出长达 1500 页的报告——《UFO 的科学研究》，经国家科学院审查后于 1969 年公开发表。报告的结论是：没有根据证明 UFO 是天外来客，对此已无需做进一步研究。同年 12 月，“蓝皮书计划”遂宣告终止。

科学家们是很严肃认真地对待各种 UFO 报告的。

用 6.3TeV/A 的 Pb 对撞，称为大强子对撞机 LHC。RHIC 和 LHC 主要用于研究夸克胶子等离子体。

(3) 放射性核束(RNB)加速器

产生放射核束的方法有两种：一种重核轰击轻靶核，重核碎裂；另一种基于在线同位素分离方式。后者由 RNB 产生加速器、靶、离子源、同位素分离器及后

加速器组成。RNB 产生为 0.5—1 GeV，流强大于 100 μA 质子加速器，通过靶核散裂和裂变等反应得到全质量数的 RNB。后加速器将使 RNB 能量达到 0.2—40 MeV/u，并可变，最好是连续束流。技术关键是放射性核束产生靶及离子源。

新一代加速器建成后，核物理将步入崭新的阶段。