



脉冲星：基础研究与战略应用

◎ 徐仁新

今天我来谈谈脉冲星。脉冲星看似是一类非常简单的天体：它们不停地在旋转；因其辐射的各向异性，故随着星体的旋转我们就观测到周期性的脉冲信号（这有点类似于航海“灯塔”）。然而，就是这么简单一种天体，其实非常重要。我今天想强调的两点是：脉冲星不但在基础科学研究领域具有极其重要的学术意义，而且拥有珍贵的战略应用价值。在基础研究方面，脉冲星是集自然界四种基本相互作用于一身的一种“极端天体实验室”，像它这样的天体是罕见的，对于人们认识自然的本质意义非浅；在应用研究方面，脉冲星因其自转周期的稳定性而被认为是一种非常重要的“国家战略资源”，这主要体现在时间标准和航天器导航上。

我先简要介绍一下自然界四种基本相互作用是如何在脉冲星身上极端地表现出来的。

因较大质量和较小半径，脉冲星的表面引力场非常强。在这么强的引力场中，广义相对论效应是不能忽略的。我们知道，在牛顿力学中两体问题是简单的并可以严格求解，但若考虑到广义相对论效应，两体问题并非简单，至今也还没有严格解。1974年赫尔斯和泰勒发现了一对互相绕转的中子星（其中一颗中子星表现为射电脉冲星）。他们进而利用此双星系统后续的演化行为来检验各类引力理论，发现广义相对论的理论预言与观测一致。1993年，赫尔斯和泰勒因检验了强引力场中的广义相对论效应并间接证明引力波的存在而获得诺贝尔物理学奖。当然，不光在双中子星系统中强引力场效应不能忽略，其实在脉冲星表面及附近发生的很多物理过程中广义相对论效应都是比较重要；后者的相关研究包括脉冲星自身的引力波辐射，表面连续谱和线谱的电磁辐射，以及磁层粒子加速机制；等等。由此可见，脉冲星是强引力场研究的重要实验室。

同时，脉冲星也是弱相互作用和强相互作用都极端表现的天体实验室。脉



冲星的诞生于超新星爆发,但其具体爆发过程是怎样的呢?目前的主流观点认为是中微子驱动的,而中微子的产生、传输过程跟弱相互作用过程紧密相关。再说,脉冲星的内部结构到底是怎样的?这是一个跟基本强相互作用行为分不开的问题。根据20世纪60、70年代以来建立的粒子物理标准模型,我们知道自然界以轻子和夸克(称为基本费米子)为基本组成单元构成,而基本费米子之间通过交换规范玻色子产生相互作用。我们熟悉的质子和中子并非基本粒子,它们实际上是由夸克组成的。基本费米子之间一般都存在电磁、弱、引力等三种基本相互作用;而夸克之间还存在一种特有的相互作用,即强相互作用。正是以夸克之间的这种强相互作用为主,决定了脉冲星的组成成分、物质状态、内部结构。所以说,脉冲星既是强相互作用也是弱相互作用的天然实验室。

另外,脉冲星还是一种在强电磁场中检验我们目前已经比较完善的量子电动力学(QED)的重要场所。比如说脉冲星表面的典型磁场可以达到 10^{12} 高斯,个别星体,比如说所谓的超磁星(magnetar)甚至可达到 10^{16} 高斯。旋转强磁场脉冲星因单极感应而产生的电场一般可达 10^{11} V/cm。如果要检验强电磁场中的QED过程,我们就必须借助于脉冲星来实现。事实上,在研究脉冲星磁层中粒子的加速和辐射行为的时候,我们将不得不考虑强电磁场中一些重要的QED过程。

综上所述,对于我们目前已知的自然界四种基本相互作用(引力、电磁、强、弱)而言,脉冲星是集其于一身的极端实验室。显见,脉冲星对于人类探寻自然的本质是极其重要的。这是我想说的第一点。

我想说的第二点就是:脉冲星的应用研究在国家战略上也是不可忽略的。北大前副校长王义遒教授曾经讲过一句话,十几年后的今天我希望转述给各位。他说,我们有很多东西都是从西方进口的,其中包括一样至关重要且我们每天都在用的东西,这就是时间,然而我们往往却察觉不到,这是一件很遗憾的事。“进口时间”意味着什么?你的时间定不准,就意味着你的空间定不准;你所有的制导设备都在定位精度上存在大问题。目前主流的时间标准是依据原子钟的。可喜的是现在部分脉冲星自转周期的长期稳定性已经赶上甚至超过了原子钟,这表明脉冲星或许是潜在的可以替代原子钟的时间标准。未来要真正实现脉冲星时间标准,当然不能依靠一两颗单独的脉冲星而必须建立脉冲星守时阵。“脉冲星钟”的建立任重而道远。



此外,脉冲星发射的非常有规律的脉冲信号,有点类似于GPS时间信号,因此原则上可以依据脉冲星信号进行空间定位。GPS是如何定位的呢?它包括24颗卫星绕地球公转,任意时刻我们只要能接收到4颗以上的卫星的信号,就可以把自己的位置定准。脉冲星也可类似地看作时钟,当然利用脉冲星也可以用来做导航。其优势在于:不但可以做战争时的导航,而且还可以做星际深空探测(比如在飞往火星、木星等的航天器上使用)。脉冲星导航研究同样需要建立脉冲星守时阵。

可见,脉冲星应用研究关键在于准确测定脉冲周期,必须依赖脉冲星守时阵来实现。而这一应用研究在基础研究上的“副产物”也很惊人,这至少表现在以下两个方面:第一,利用脉冲星守时阵测量宇宙空间的背景引力波。当空间存在背景引力波时,将改变不同方向上脉冲星信号的测得周期;而背景引力波导致的这种“改变”具有特定的角度关联。若能测出这种关联,就可以反过来确定背景引力波的特征。第二,通过脉冲星守时噪声行为研究脉冲星物态与结构。“脉冲星具有准确的时钟信号”只是一种粗糙的说法,实际上脉冲星发出的自转周期本身就存在某种不确定因素导致的微小波动(称为“守时噪声”)。导致守时噪声因素很多,部分因素与脉冲星物态与结构有关。若能分辨出这类守时“噪声”,无疑有助于解决“脉冲星内部结构”这一挑战性问题。

从以上的介绍中我们看到,脉冲星研究这一课题不论在基础研究还是在应用中都占有重要的地位,而且紧密纠缠、互相促进。历史上是否碰到过、研究过类似于“脉冲星”这样研究对象呢?实际上是有的。在人类认识自然的历史中,出现过的一个类似客体,它也同时具有非常重要基础科学意义和战略利用价值,这就是原子核。原子核是非常重要的:它不仅是我们的认识跨越到微观领域的一个非常重要的物质层次,而且与之紧密相连的原子弹及其爆炸改变了人类的战争史和文明史。所以,我觉得原子核和脉冲星研究具有某种异曲同工之处。我曾经多方面对原子核和脉冲星研究作过比较,得到的结论是支持以上这一看法的。因为时间关系,这里就不赘述了。

下面再说说我们的一点新观点和新想法。这几年来我们一直在脉冲星这个领域做研究,包括它的辐射、内部物态等方面。今天我只想谈谈我们关于物态的研究。脉冲星内部的物态和结构到底怎样,其实刚才已经讲了,其回答是



强烈地依赖于人们对于夸克之间基本强相互作用的认识的。从天体物理视角出发,通过研究丰富的各类致密星观测现象,我们提出了在致密星内部的低温夸克物质中应该存在夸克集团(Quark Cluster);当温度足够低时可形成固态夸克物质,而非目前国际流行的“色超导”态夸克物质。

现在一般认为,描述夸克之间强相互作用的基本理论是量子色动力学(QCD)。类似于 QED 中电荷之间的力,QCD 中色荷之间也存在一种色力。形象地讲,色力导致了我們目前所了解的丰富的强相互作用现象。QCD 在 20 世纪 60、70 年代以来发展很快,具有一些符合实验的特征,其中之一就是所谓的“渐近自由”。2004 年的诺贝尔物理学奖就是为了表彰获奖者在 QCD 的基础上得到了实验上先前发现的渐近自由行为:在高能极限(高温或高密)情况下,夸克是渐近自由的、之间互相作用很弱。然而在低能(温度和密度不是极端高)情况下,夸克之间色相互作用较强,但具体特征如何目前尚未明朗。而恰恰是 QCD 在低能情形下的行为,对于我们认识自然界是非常关键的。所以美国克莱数学研究所在 20 世纪到 21 世纪初立了七个“世纪奖金问题”。现在有一个已经被解决了,就是彭加莱猜想;剩下的六个难题之中就有一个跟 QCD 低能情况下的性质研究紧密相关。碰巧的是,我们现在要研究的脉冲星物态,与 QCD 的低能行为非常密切。

在所谓的 QCD 相图上阐述我们的观点和想法是很方便的。QCD 相图刻画

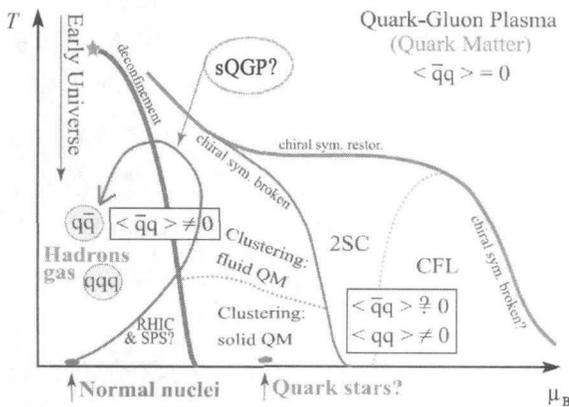


图 1 推测的 QCD 相图

了强作用主导下可能存在的各种物态;横坐标是重子的化学式,或者可以近似看作重子的数密度,纵坐标是温度。因强作用物态本质上涉及 QCD 的低能行为,所以至今未能从 QCD 第一性原理出发给出 QCD 相图,只能根据某些一般性规律(如对称性)来推测;图 1 即为一例。因渐近自由,在温度或密度足够高的时候,



也就是高能极限下,夸克之间的相互作用可以忽略。所以很早人们就想到,高温或高密情况下可能出现所谓的夸克胶子等离子体(Quark Gluon Plasma, QGP),或者叫夸克物质(Quark Matter)。那么,低能情况下由夸克组成的物质是什么样的呢?原子核就是一例。原子核由核子(质子和中子的统称)组成,而包括核子在内的强作用粒子又称为强子。所以应该有一条相变曲线,把低能情况下的强子相和高能情况的 QGP 相分隔开来(尽管还不知道这条曲线的准确位置在哪)。

在致密天体环境中我们关心的夸克物质都是低温的。因夸克是费米子,若完全忽略夸克之间的相互作用,低温夸克物质可看做费米气。然而夸克之间本身就存在的吸引作用可能导致费米面失稳形成夸克对,所以在较高密度情况下,夸克物质可能出现类似于 BCS 态的色超导。很早就有人提出这样的色超导观念,且这一观点近年来在国际上讨论得很热烈。不过我们的看法是:在密度极高的区域里确实可能存在色超导态,但是现实的脉冲星其实并没有那么高的密度,所以致密星内部可能不存在色超导态,而是我们提出的夸克集团(Quark Cluster)态。尽管在极高密度情况下,夸克物质基态可以近似看做费米气,但 QCD 有一个特点,即:随着密度的降低,夸克之间的相互作用越来越强。所以当密度降低至脉冲星内部密度(只有几倍核物质密度)的时候,由于夸克间很强的相互作用,我们认为应该会形成夸克集团。当然,我们还没能从 QCD 第一性原理出发推演出夸克集团的存在,否则这个猜测就不会再有争议了。更重要的是,我们提出夸克集团态在高温下是流体,但在低温下却是固体。而固体夸克集团态对于我们理解丰富的致密星相关天体物理现象,比如脉冲星的进动、Glitch、SGR 的爆发等,是非常有必要的。

我们提出的这个观点还需要未来的各种观测检验,包括以脉冲星应用为目的而进行大量观测。举个例子,脉冲星守时噪声多种多样,而守时噪声背后隐藏着非常丰富的物理内涵——所谓“新物理埋藏于噪声之中”。若脉冲星内部由夸克集团物质组成,则将具有特定的守时噪声行为;观测上若分辨出这些守时噪声特征将是对夸克集团观念的支持。

袁业飞:

因为你比较关心奇异星在天体物理的环境当中, Piran 曾经写过 *Review* 文章, 提到伽玛暴的贡献者 Pazinsky 的最后一个思想很可能跟奇异星有关, 你对这个观点有什么评价?

徐仁新:

确实 Pazinsky 最后一篇关于伽玛暴的文章发表在 *MNRAS Letter* 上, 其基本思想是这样的: 夸克表面实际上可看做一个膜, 这个膜可以穿透轻子或光子, 但因夸克禁闭不能穿透夸克; 这有助于得到一个干净的伽玛暴火球。这表明他意识到需要夸克表面制造 GRB 的干净火球, 尽管这一想法在他们论文之前就被其他作者所强调。然而 GRB 动力学中的火球是否真得这样形成的, 夸克表面的存在还有什么样更多的天体物理后果, 这些需要未来大量的研究。

毕效军:

你说脉冲星可能存在一个夸克集团态, 还分为固态和液态, 这些有没有办法检验?

徐仁新:

这是一个从物理学角度经常会被提出的问题。从天文学的角度讲, 一个天体是固体还是流体, 差异显然是巨大的。比如说如果地球是液体的、缺乏剪切力支撑其表面的物体, 我们还能在这里开会吗? 最明显的一个差异就是天体自转的进动问题。流体旋转一般是不可能进动的。固体具有刚性, 内部可以积累弹性, 所以它的自转轴未必和惯量椭球的对称轴一致; 当二者不一致的时候, 就产生进动, 甚至自由进动。因此观测一个天体的自转是否有进动, 就可以判断出它倾向于是固体还是流体。另外, 由于固体内部可以积累弹性势能, 固体星球经常会出现星震 (star quake), 比如地球的地震; 而液体是不会具有的。这也是一大差异。



王建民:

在目前的条件下,有没有可能在地面上的加速器实验里得到夸克集团?

徐仁新:

地面加速器中产生的 QGP 是温度比较高的,而致密天体中夸克物质的温度是比较低的。所以为了检验有没有色超导,德国要建一个低温加速器,其温度可以降低到几十个 MeV。但这个温度其实还是太高。因为在脉冲星刚诞生的时候,内部温度大概在 30 MeV 至 50 MeV 范围,而现在,其星体温度已经降到 keV 以下。可见致密星内部与加速器拟建立的低温环境差别还是很大的。所以要在地面实验室中造出和脉冲星上完全一样的夸克集团,我认为是不太可能的。但夸克集团这个概念是可以被实验检验的。夸克集团形成依赖于夸克物质之间非常强的相互作用,但是如何来计算这样强耦合的粒子系统?这个问题还没能解决。大家都意识到极端高密度情况下渐近自由肯定没问题,随着密度的降低相互作用越来越强,这有利于夸克集团的形成。实验检验夸克集团观念的一个办法是:看看实验室相对论重离子碰撞过程中是否会出现类似夸克集团的“夸克分子”。



表 SCI 收录研究论文 60 余篇,在国际上被引用 530 余次。2004 年入选教育部首批新世纪优秀人才支持计划,2005 年获国家杰出青年科学基金。2004 年获教育部自然科学二等奖。

徐仁新

1967 年 4 月出生于江苏高邮。现任北京大学物理学院天文系副系主任。主持“脉冲星内部结构及相关问题的研究”、“脉冲星磁场及有关问题的研究”、“裸奇异星物理及其观测证认”、“各种脉冲星类天体辐射与本质的研究”、“立足于国内的脉冲星观测与理论研究”等国家自然科学基金,参与“天体高能辐射的空间观测与研究”、“黑洞以及其他致密天体物理的研究”等“973”项目;发表 SCI 收录论文 60 余篇,编著《天体物理导论》一部。



袁为民

1966 年 5 月生。博士,博士生导师,云南天文台首席科学家。1999~2001 年在日本宇宙开发事业团筑波宇宙中心从事博士后研究工作,2001~2004 年在英国剑桥大学天文研究所(IOA)从事博士后研究员工作。2004 年获中国科学院“百人计划”择优支持的海外杰出人才。研究领域:观测天文学、高能天体物理/X 射线天文学、光学天文学。研究方向:活动星系核、星系、黑洞,发表 SCI 论文多篇。



袁业飞

1972 年 8 月出生于安徽省当涂县。现为中国科技大学教授,博士生导师。1999 年获中国科学技术大学天体物理专业博士学位,1998 年获中国科学院院长奖学金优秀奖。2001 年 1 月被破格聘任为中国科学技术大学副教授。2005 年 12 月晋升为教授。现任中国科学技术大学天文与应用

