

中子星——一个巨大的汤姆逊原子

★南京大学天体物理研究室 陆 垓

① 已知原子核组成的半岛

大家都知道，一个原子核是由一些质子和一些中子组成的高密物质。如果用质子数 Z 做纵坐标，中子数 N 做横坐标，那么已知的原子核大体上都分布在对角线附近，如图 1 所示：就是说，一个原子核内，质子数大体上与中子数相等。比如，常见的氮原子核 ^{14}N 是由 7 个质子和 7 个中子组成，而钙原子核 ^{40}Ca 是由 20 个质子和 20 个中子组成。但是，随着质量的增大，原子核内的质子多起来，库伦排斥力就增大，使得稳定的原子核渐渐偏离对角线而向着中子偏多而质子偏少的方向弯曲。比如铁原子核 ^{56}Fe 由 26 个质子和 30 个中子组成，碘原子核 ^{127}I 由 53 个质子和 74 个中子组成。事实上，所有观测到的原子核，天然的和人工的，稳定的和放射性的，长寿命的和短寿命的，都集中分布在这条略有弯曲的近似对角线附近，形成半岛状分布。但是，这个半岛只能延伸到 $Z \sim 106$ 的地方，实际上， $Z > 92$ 的原子核(超铀元素)都是不稳定的。 Z 越大，原子核越不稳定，越容易自发裂变。 $Z > 106$ 时，原子核寿命将短到无法观测。更重的原子核是无法形成了。所以，半岛以外，乃是一片不能存在原子核的汪洋大海。

② 一个可能的超重核小岛

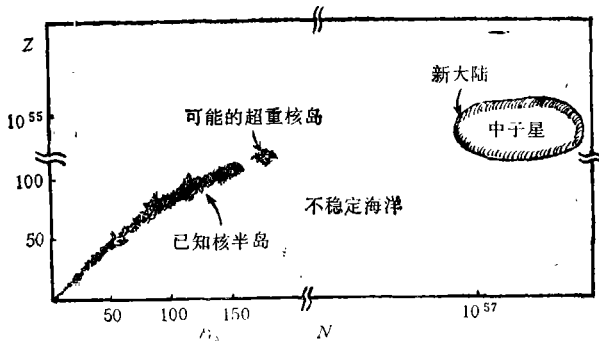


图 1 原子核的 $Z - N$ 图

由于 $Z = 114$ 是一个幻数，这种原子核可能比较稳定地存在。有一些理论预言，在 $Z = 114$ 附近可能会存在稳定或比较稳定的原子核。因此，半岛之外，在岛端邻近，可能存在一个稳定或比较稳定原子核的小岛。不过，岛上的原子核还没有被实验发现过。应当

指出的是，即使小岛存在，它也不可能延伸到 $A (= Z + N) \gg 300$ 的地方。由于原子核主要由强作用和电磁作用决定，而强作用是短程力，库伦力却是长程力。前者起束缚作用，后者起瓦解作用。因此，很重的核是不稳定的。

③ 中子星是巨原子核

如果我们从半岛出发，经过在汪洋大海中长途跋涉，在很远很远的地方，可以发现一块稳定原子核的新大陆，这就是中子星，见图 1 所示。这是由 10^{57} 量级的中子和 10^{57} 量级的质子组成的原子核。这个原子核的半径约为 10 公里，比喜马拉雅山的高度还要大一些。它的质量比地球还重约五十万倍。它的密度与常见原子核的密度差不多，甚至更高，约为每立方厘米三亿吨。

这是一个宏观大小、宇观质量的巨大原子核！

这样大的原子核束缚得是否很紧，结合得是否很牢呢？是的，非常牢，比常见的原子核还要牢得多。结合得牢不牢有一个参数可用来作衡量标准，这就是结合能。通常原子核内一个中子或质子的平均结合能约为 8MeV ，就是说，你要从通常原子核内取出一个中子或质子，你得作约 8MeV 的功。在中子星内，这种结合能将高达约 100MeV 。实际上，中子星不是依靠强作用，而是依靠万有引力来束缚的。单个粒子的引力十分微弱。但是，引力是长程力，随着粒子的增多，这种引力会越来越强。当核子数达 10^{57} 量级时，这种引力强到使其形成新的稳定体，这就是中子星。

④ 中子星更是巨原子

由中子和质子组成的原子核，如果再加上与质子数相同的电子数，使整体成为电中性，这就是原子，在原子物理发展的早期，汤姆逊曾认为，原子是一个正电荷连续分布着的球体内嵌着一些电子。这就是有名的汤姆逊模型。但是，自从 1911 年卢瑟福发现，原子内的正电荷是集中在一个极小的体积内的，从而发现了原子核。由于原子核很小，测不准关系告诉我们，如果电子局限于原子核内，它必须有很大的动量，从而有很大的动能，这是不符合实验事实的。因此，电子必须占有比原子核大得多的空间。卢瑟福提出的电子绕原子核运行的行星式原子模型就具有这一特点。1913 年玻尔在卢瑟福模型基础上成功地解释

了光谱线的规律。此后,汤姆逊的原子模型就被淘汰。虽然,卢瑟福行星式经典原子模型已被1926年发展起来的量子力学理论所取代,但是,电子占有比原子核大得多的空间这一特征却仍是正确的。

中子星这样一个巨大原子核,其体积非常大,电子不再需要占有比中子星还大的空间。实际上,中子星内应当有与质子数相等的电子分布着,使中子星成为电中性的。因此,中子星是中子与少量质子和电子的混合体,它应当是一个非寻常的巨大的原子,而且是一个汤姆逊原子。

中子星内少量质子和电子的存在是十分重要的。我们知道,自由中子是不稳定的,它会衰变成质子和电子和中微子(确切些说,应为电子型反中微子 $\bar{\nu}_e$)。但在中子星内,正是这些少量质子和电子已经将中子衰变放出的质子和电子的可能状态填满了,泡利不相容原理不允许中子星内的中子进行衰变。其实,中子星内的中子、质子和电子数正是如下衰变过程和俘获过程:

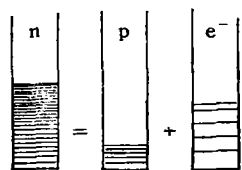
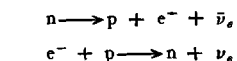


图2 中子星内中子、质子、电子能级填充情况



平衡的结果。中微子 ν_e 和反中微子 $\bar{\nu}_e$ 作用非常微弱,它们一经产生就射离中子星。图2绘出了中子星内中子、质子、电子能级的填充情况。为简单起

见,图中所画为绝对零度(在中子星内近似成立)时的情形,能级从下面起逐个填满。粒子填充的最高能级称为费米能级,绝对零度时也就是化学势,记为 μ 。平衡的条件就是反应前后化学势相等,即:

$$\mu_n = \mu_p + \mu_{e^-}$$

由于 μ 值以下的能级均已填满, μ 值以上的能级则完全空着,任何一个中子的能量必小于 μ_n 。过程的能量守恒表明,中子衰变放出的质子和电子的总能量必小于中子能量(因为反中微子还带走了一部分能量),因而也必小于上式中的 $\mu_p + \mu_{e^-}$,而那些能级已被质子、电子填满,使得中子衰变成为不可能。这就保证了作为中子星的巨大汤姆逊原子能够稳定存在。

⑥ 中子星的结构

中子星那么大,其内不可能是均匀的。事实上,中子星的密度就是从外向里逐渐增大的。不同密度下有不同的物态。由于强作用尚研究得不够清楚,人们还不能十分确切地给出中子星的物

态。然而,根据某些比较合理的模型,可以给中子星的结构以一个大概的了解。图3给出了计及三核子作用的质量为 $1.4M_{\odot}$ 的中子星剖面结构。外壳层是原子核与电子的混合体;内壳层是富中子核、自由中子和电子;其内一个相当大的区域由超流中子、超导质子和正常电子构成;核心部分还不十分了解,也许密度太高,已挤压成夸克物质。

物态随密度的变化大体上可以这样来理解:当密度 ρ 虽然很高但仍小于 10^7 克/厘米³时,物态主要是原子核(特别是 ^{56}Fe)的点阵与相对论性简并电子气组成。当密度超过 10^7 克/厘米³时,电子的费米能量越来越高,它与原子核中的质子作用而变为中子并射出一个中微子。多次这种过程使原子核内的中子越来越多而生成富中子核。当密度达到 4.3×10^{11} 克/厘米³时,原子核内的中子多到开始滴出核外而成为自由中子。当密度达到 2.8×10^{14} 克/厘米³时,核与核开始挤在一起而成为带有只占百分之几质子和电子的中子物质。

⑦ 超流中子、超导质子和正常电子

从图3可以看出,中子星内部主要区域是由中子、质子和电子组成的混合液体。特别值得注意的是,这里的中子液体是超流(不受阻力)的,质子是超导的,然而电子却是正常的。

近年来,由于米勒和贝特诺兹发现高温超导,重新掀起了超导研究的热潮。如今,超导临界温度已提高到100 K以上。根据BCS理论,电子首先要通过吸引力而形成库柏电子对,才能呈现超导现象。超导临界温度是与库柏电子对的结合能密切相关的。通常超导体库柏电子对的结合能在 10^{-4} 电子伏量级,因而临界温度只有绝对温度几度。但是,对于核物质,质子和中子的对能均在MeV($=10^6$ 电子伏)量级,因而中子星内质子超导和中子超流的临界温度将高达 10^{10} K!中子星内的温度一般仅为 $10^6 \sim 10^8$ K,这样的温度远低于临界温度,这就保证了质子的超导性和中子的超流性。相反,电子不具有强作用,它们的对能很低,电子超导的临界温度就远低于中子星内的实际温度,使电子不可能处于超导态。

⑧ 中子星提供了极端的物理条件

中子星是一个宏观大小和宇宙观质量的天体,其物理环境必然与地球十分不同。

上面已经指出,中子星的质量与太阳差不多,而半径却只有约10公里,其密度高达约为 3×10^{14} 克/厘米³,比地球物质的密

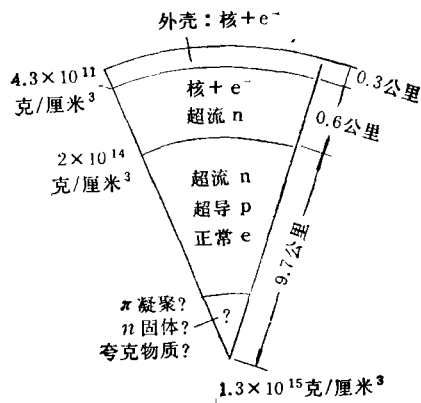


图3 计及三核子作用的 $1.4M_{\odot}$ 中子星的结构剖面图

度高 14 个量级(一百万亿倍)。除此而外,还可推算出:中子星表面的万有引力比地球表面要强 10^{11} 倍。中子星表面的磁场强度可以高达 $10^8 \sim 10^9$ 高斯。要知道,在地球上采用先进技术所能达到的最强的磁场也不过 $10^2 \sim 10^6$ 高斯。中子星内的压强更可以高达 10^{28} 大气压。这些物理条件是地球上难以想像和无法达到的。

可见,中子星提供了一个天然的极端物理条件的实验室。研究中子星上发生的各种物理现象,能给地球上实验室所获得的对物理规律的认识以极其重要的补充,甚至给出完全新的认识。

⑨ 夸克星应当是奇异的

质子、中子都是由更基本的粒子夸克组成。质子由两个 u 夸克和一个 d 夸克组成,而中子则由一个 u 夸克和两个 d 夸克组成。

中子星的核心部分密度极高,很可能中子与中子会挤在一起而成为夸克物质。就是说,中子星的核心部分很可能不再能见到一个一个的中子,而表现为直接由夸克组成的物质。由于质子含量极少,这种夸克物质中 d 夸克的数量差不多两倍于 u 夸克,如图 4 所示。 u 和 d 的质量很小,可以忽略。 u 和 d 也按能级从下往上填。作为粗略估计,略去夸克之间的相互作用,在此情形下, u 夸克一直填充到约 520 MeV,而 d 夸克可填到约 650 MeV。值得注意的是,质量在 650 MeV 以下还有一个夸克 s ,其质量在 100~300 MeV

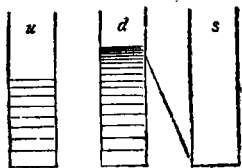


图 4 夸克能级填充图



之间。 s 是奇异夸克,带有奇异量子数 $S = -1$ 。由于在弱作用过程中奇异数可以不守恒,而 d 的费米能量 650 MeV 又远大于 s 质量,如下过程:

就很容易发生,使大量 d 夸克转化为 s 夸克。事实上,如果忽略 s 夸克质量,平衡时 u 、 d 、 s 三者的数目应当相等。在计及 s 夸克质量的情况下,也只是 s 夸克比 d 夸克稍少一些,绝对数目却是相当大的。我们计算了 u 和 d 二味夸克物质转化为 u 、 d 和 s 三味夸克物质的过程,可以证明这是非常快的过程,时标短到仅为 0.1 微秒量级。因此,一旦中子星内形成了夸克物质,它必定是奇异的,即带有非常大的奇异数。

对于夸克物质而言,奇异物质比正常物质更稳定。就是说,夸克物质的基态是奇异的。在通常原子核中情况正好相反。比如, ${}^4\text{He}$ 中的一个中子换成 Λ 超子就成为其奇异的对应体 ${}^4\Lambda\text{He}$,但是, ${}^4\Lambda\text{He}$ 的能量高,不稳定。基态是 ${}^4\text{He}$ 而不是 ${}^4\Lambda\text{He}$ 。所有通常原子核都不带奇异量子数,其奇异对应体(称超核,因为有超子取代了核内的一个或几个核子)都不稳定,都会衰

变为通常的非奇异原子核。

相比之下,作为巨大原子核的中子星,其内含有夸克物质时,必然是奇异的,就成为令人惊奇的新特征。夸克星一定是奇异星!

⑩ 奇异星的特殊性质

中子星的核心部分为奇异夸克物质,或者甚至整个星体均为奇异夸克物质,它就带有很大的奇异数,可以称之为奇异星。

奇异星的一般性质与中子星相仿,很难区分。但奇异星也有一些不同的性质。我们曾计算过,奇异星冷却得比中子星快,因此奇异星,特别是年轻奇异星,表面温度显著低于同年龄中子星。我们也计算过,当奇异星产生径向振动时,奇异数改变的夸克弱过程 $ud \leftrightarrow us$ 会极有效地在毫秒量级短时标内使振动衰减掉,而且是迄今所知衰减掉径向振动的最有效机制。这些短时标过程还有可能引起爆发现象。

⑪ 如何观测和发现中子星?

中子星的发现曾经历了漫长的岁月。

1932 年英国查特威克发现中子的消息刚刚传到哥本哈根,正在丹麦访问的苏联学者朗道就预言应当存在中子星。1934 年,巴德和次威基甚至明确指出,超新星爆发可以生成中子星。1939 年,奥本海迈和伏科夫根据广义相对论进一步求出了中子星的结构。但是观测上的进展却十分缓慢,甚至长期没有人去尝试。普通恒星的辐射基本上是一种黑体辐射。光学波段大体相当于绝对温度 10000 度。斯忒藩—玻茨曼定律告诉我们,黑体表面单位面积辐射功率只决定于温度 T ,即正比于温度的四次方 ($=\sigma T^4$),比例系数是一个常数,称斯忒藩—玻茨曼常数。由于中子星的表面积很小,其总光学光度低到用现代望远镜也根本无法观测到。

究竟怎样有效地观测和发现中子星呢?

中子星尺度很小,直径只有约 20 公里。一般地,一个尺度为 l 的天体,即使其上发生了一个瞬间的现象,地球上观测到的这个现象却延续了 $\Delta t \sim l/c$ 这么长的时间。原因在于天体上不同部位的辐射传播到地球上会有先有后,前后时间可以相差 l/c 。因此,如果地球上观测到时标为 Δt 的变光现象,对应天体的尺度应为 $l < c\Delta t$ 。中子星尺度小,短时标现象的研究将是观测和发现中子星的重要途径。

中子星往往具有 $10^8 \sim 10^9$ 特斯拉的极强磁场。观测强磁场现象也是发现中子星的重要途径。

随着中子星的转动,磁场还会感生强电场。中子星的引力场也十分强。发生在中子星上的过程往往会释放极高的能量。其辐射常常在 X 射线和 γ 射线波段。但是, X 射线和 γ 射线会被地球大气层吸收。随着空间科学的发展, X 射线和 γ 射线天文卫星成为了观测和研究中子星的重要手段。

★探索者

电子大小的估算与测量

●赵国球

电子具有粒子性，又具有波动性，这是大家公认的。然而在电子的粒子图象和波动图象中，如何估算电子的大小？实践中，又是如何进行测量的呢？本文就有关问题进行一些论述。

一、经典电子论中电子大小的估算

经典电子论中，一个静止电子周围的电场 E 表示为：
$$E = e/4\pi\epsilon_0 r^2 \quad (1)$$

相应静电场的总能量 $W_{静}$ 由下式给出：
$$W_{静} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \int E^2 dV,$$
 dV 为电场中的体积元。积分遍及整个空间。若假设电子的电荷分布在半径为 a 的球面上，在电子外面电场

E 由 (1) 式给出。相应的能量为：
$$W_{静} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \int E^2 dV = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{2a} \dots\dots (2)$$

若假设电子的电荷均匀地分布在半径为 a 的球体内，且电荷的体密度为 ρ_e ，则电子的静电自具能(即电场能)为：
$$W_{静} = \frac{1}{2} \rho_e \int U dV = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{3e^2}{5a} \quad (2)'$$

忽略式中系数的影响，不改变 (2) 式所具有的普遍性。它表明电场的能量与电子的半径密切相关。根据相对论的质能关系，能量 $W_{静}$ 必然对电子的质量 m 有所贡献，从质能关系式可以得到：
$$mc^2 = m_0 c^2 + W_{静},$$

于是有：
$$m = m_0 + \frac{W_{静}}{c^2} \quad (3)$$

(3) 式中 m_0 是电子的力学质量，它可以理解为所有非电磁起源对质量的贡献。对应于全部电子质量都是电性起源这一假设，电子的半径有个最低限，即 $m_0 = 0$ 时，有：
$$m \geq \frac{e^2}{2c^2 a}, \quad \text{则 } a \geq \frac{e^2}{2mc^2}$$
 通常以 $r_0, r_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$

因此，观测和发现中子星经常与短时标过程的研究和 X 射线、 γ 射线的研究密切相关。

从斯忒藩—玻茨曼定律已经可以看到，即使是黑体辐射，如果中子星温度比较高，比如 $10^7 \sim 10^8 \text{ K}$ ，光度与温度的四次方成正比，中子星就可以被观察到。不过，这时不在可见光，而在 X 射线波段 (1~10 千电子伏)。事实上，1962 年伽柯尼等就发现了太阳以外的宇宙 X 射线源。这个发现确也引起了一些人研究中子星的兴趣。但是，单个高温中子星会比较快地冷却，因而人们并未认真地将这些 X 射线源看作中子星。直到 1968 年休维希和贝尔等人在射电波段发现了一颗脉冲星 (PSR 1919 + 21，以其位置的赤经、赤纬冠以 PSR 表示)，才真正掀起了中子星研究的热潮。他们发现的是周期为 1.337 秒的 81.5 兆赫射电脉冲。同年，高尔德论证它是一颗转动周期为 1.337 秒的自转中子星。这是第一个确证发现的中子星。

⑩ 中国为两颗中子星签发了出生证

第一颗脉冲星刚被发现不久，1968 年，恩塔林和莱芬斯坦发现了蟹状星云脉冲星 (PSR 0531 + 21)。这颗脉冲星的周期为 0.033 秒。后来，人们也在光学波段、X 射线波段和 γ 射线波段观测到了这颗脉冲星。有趣的是，这颗脉冲星就在中国南宋天文学家于公元 1054 年发现的超新星爆发的位置上。根据脉冲星周期变化和蟹状星云膨胀速度估算出的年龄与诞生于 1054 年的推算相近。现已公认，PSR 0531 + 21 这颗脉冲星是 1054 年超新星爆发产生的。就是说，这是一颗由中国签发了出生证的中子星，其年龄精确已知，今年 (1993) 939 岁。长期以来，只有这颗中子星的年龄是精确已知的。

1990 年，我们曾从理论上预言过一些射电脉冲星可能也是 γ 射线脉冲星。PSR 1509-58 就是其中的一颗，美国 γ 射线卫星康普顿天文台 CGRO 最近证实它确也是一颗 γ 射线脉冲星。有趣的是，这颗脉冲星就在中国东汉天文学家于公元 185 年发现的超新星爆发的地方。根据脉冲星周期变化估算的年龄也支持它诞生于 185 年。《后汉书·天文志》记载：“中平二年(孝灵帝)十月癸亥，客星出南门中，大如半筵，五色喜怒，稍小，至后年六月消。”其中客星(此处指超新星)出现的地方“南门”和时间“中平二年十月癸亥(对应于公元 185 年 12 月 7 日)”均与脉冲星 PSR 1509-58 很接近。因此，非常可能，这是又一颗由中国签发了出生证的中子星，今年 1808 岁。银河系内，历史上有记载的超新星爆发一共只有七次，中国均有记载。公元 185 年那次超新星爆发，全世界只有中国有记载。上面所引《后汉书·天文志》的那句话就是关于那次超新星爆发的全部资料。

⑪ 三言两语

迄今为止，中子星已被发现了近两千颗。其中，为数最多的要算脉冲星和 γ 射线爆两大类。人们已经观测到五百多颗脉冲星和一千多个 γ 射线爆。中子星的表现多种多样，物理现象十分丰富。现在是从射电、光学、X 射线、 γ 射线各个波段来全面考察中子星的时候了。诸多内容，无法详述。这篇短文只在于提醒大家注意，在你们处理核子数小于 300 的常规原子和常规原子核时，不要忘记，在不稳定的汪洋大海以外，还有一块五彩缤纷的新大陆，这就是中子星。经过一番努力耕耘，一幅中子星的美丽图画必将展现在眼前！