

# 脉冲星就是巨大的原子核\*

徐仁新（卢吉光 译）

## 摘要

脉冲星的本质是什么？这是涉及低能强相互作用（非微扰量子色动力学）的一个基本问题，其根本解决关系到克雷数学研究所提出的千禧七大疑难之一（即“Yang-Mills Theory”）。80年前L. Landau曾推测宇宙中存在巨大的原子核。经过历史回顾之后，我们将阐述脉冲星其实非常类似于巨大原子核，但亦略有不同。本文拟从致密星的不同观测表现以及强相互作用的一般行为两方面揭示了脉冲星与巨大原子核的相似性。

关键词：脉冲星；量子色动力学；大原子核。

## 1 什么是大原子核？

让我们先来看看构成普通物质的小原子核。古代哲学家提出原子概念后人们一直认为原子是构成物质的基本粒子，直到1897年J. J. Thomson在研究阴极射线时发现了原子中存在极轻的带负电粒子——电子。Thomson用“葡萄干布丁”图像来诠释他的原子模型：一些带负电的电子镶嵌于均匀的正电荷背景上。1911年，这一模型受到了E. Rutherford等利用 $\alpha$ 粒子在金箔上散射实验的冲击：原子（大小 $\sim\text{\AA}$ ）的质量及其正电荷实际上集中于一极小的区域（ $\sim\text{fm}$ ）！尽管Rutherford推测“Under some conditions, however, it may be possible for an electron to combine much more closely with the H nucleus, forming a kind of neutral doublet” [1] 且双子（doublet，后来称之为中子）存在于原子核中，那时还是引发了一场有关于原子核组份的论辩。

小原子核是像什么样的？G. Gamow于1928年至1931年在哥本哈根大学访问的时候曾提议将原子核视为由核物质构成的不可压缩液滴 [2]。这一图像影响深远；即便有人在1974年基于原子核巨共振现象与弹性体的相似性而认为原子核呈固态 [3]，液滴模型依然流行。

1932年的二月是科学史上的美谈，因为在这一个月之中发生了三件大事。（1）24岁的L. Landau 发表了一篇有关大原子核的文章 [4]：“We expect that this must occur when the density of matter becomes so great that atomic nuclei come in close contact, forming one gigantic nucleus.”（即“小液滴”足够靠近在一起形成一个“大液滴”）这篇文章有两条注释：文章开始处的“Received 7 January 1932”以及文章末尾处的“February 1931, Zurich”。（2）J. Chadwick发表了题为“Possible existence of a neutron”的文章 [5]，编辑部1932年2月收到该文。（3）该

---

\*Xu, R. X. 2011, Pulsars: Gigantic Nuclei, Int. Jour. Mod. Phys. E, 20 (S1) 149-157

月24日，Chadwick给Bohr写了一封信，讨论有关中子与原子的问題。根据以上信息我们认为Landau是在中子正式发现之前就猜测有大原子核了。

Landau写这样的一篇文章有两方面的动机。在1930年左右有一个非常热门的话题是恒星在引力作用下的平衡问题，特别是由电子简并压抗衡引力的白矮星的最大质量 [6]。如果星体质量超过这一上限会发生什么？Landau考虑如下两个后果：（1）会释放出巨大的引力能；（2）当原子核都被挤在一起时引力坍缩将停止。Landau认为形成巨原子核过程中所释放出的引力能就是恒星释放能量的根本来源。这个结论当然是错误的，但那时却是人们首次意识可能存在具有达到原子核饱和密度的宏观物质（这是G. Gamow所言微观“液滴”的推广）。现在我们知道，这类宏观的“大原子核”对我们理解各种极端天文观测现象是非常必要的。

值得提醒的是：尽管以凝聚态物理特别是超流理论方面的基础工作而闻名，Landau确实很看重自己所提的“大原子核”想法。根据Aksenteva编撰的“Complete list of L D Landau's works”一文 [7]，将Landau在Nature杂志共发表六篇文章，但只有三篇单独署名，列于如下。

(i) L. Landau, “Origin of stellar energy”, Nat. 141, 333 (1938)

(ii) L. Landau, “The theory of phase transitions”, Nat. 138, 840 (1936) Brief message of “ZETF 7 (1937) 19, 627; Phys. Z. Sowj. 11 (1937) 26, 545”

(iii) L. Landau, “The intermediate state of superconductors”, Nat. 141, 688 (1938) Brief message of “ZETF 13 (1943) 377; J. Phys. USSR 7 (1943) 99”

上面三篇文章中的第一篇实际上是基于1932年发表的那篇文章 [4] 而成；而后面两篇是对以前工作的总结（这方面的研究使他于1962年获得诺贝尔奖）。为何Landau再次阐述有关于大原子核与恒星能量的想法呢？一种观点认为1937年Landau为了抵抗他所受政治压力而向Nature杂志投稿。文章最终在1938年得以发表，但此时Landau还是被捕入狱（1938年4月28日至1939年4月29日期间，他在狱中度过）。从这儿我们便可以看出Landau对于恒星研究的兴趣。

如果把质子 ( $p$ ) 与中子 ( $n$ ) 都视作基本粒子的话，那么大原子核一定是丰中子的。这是因为电子 ( $e$ ) 将处于大原子核的内部（而电子在小原子核内出现的几率甚微），参与如下化学平衡



在这里中微子 ( $\nu_e$ ) 的化学势可以忽略。由此可见，如果质子、中子像电子、中微子那样是基本粒子（即无结构的“点”粒子），电子在大原子核内参与弱平衡必然出现富中子。这就很容易理解，巨大原子核的概念在中子发现后很快被“中子星”一词所取代。然而问题是：包括核子在内的强子并非如1930年代想象的那样基本，它们是有结构的！

是否存在中子星的天文表现呢？1934年，Baade与Zwicky [8] 研究源于超新星的宇宙线（离子），并推测形成中子星过程所释放出的能量可能是超新星而非一般恒星的能量来源。然而他们对于中子星形成机制的看法（“If neutrons are produced on the surface of an ordinary star they will ‘rain’ down towards the center if we assume that the light pressure on neutrons is practically zero”）并非谨慎。后来有人认为在超新星的核心区域会形成热中子星而向外辐射X射线 [9]，并且推测中子星所拥有的转动能为超新星遗迹供能 [10]。1967年，射电脉冲星的发现是

一个突破 [11]，且很快被证认为旋转中子星 [12]。

值得强调的是L. Landau与G. Gamow是圣彼得堡大学“三剑客”之二。当时他们都感兴趣于科学前沿问题，而且互通有无并终生受益。简而言之，1930年左右，Gamow提出了微观原子核液滴图像，而Landau则更进一步地提出了在引力束缚天体内存在宏观核物质——“大原子核”。遗憾的是，直到80年后的今天，我们依然未能确定这一大原子核/中子星的本质。

## 2 Landau在23岁时所犯的两个错误

受二十世纪三十年代科学发展背景所限，Landau关于大原子核的看法中存在若干错误的观念。下面我们就来讨论和分析一下Landau于1932年发表一文 [4] 中的两个错误。

**错误1：**大原子核内量子力学失效以致质子和电子可“非常紧密地结合”（用现在的话讲就是束缚于飞米量级上）。当然我们现在知道，电子与质子间由电磁相互作用束缚；若服从被已经很好检验的量子力学的话，那么它便只能是一个如氢原子般相对较弱的系统（在埃的量级上）。

Landau之所以会犯这样的错误是因为那时尚未发现弱相互作用。我们现在知道，弱相互作用能够通过反应方程(1)将一个质子和一个电子转变为一个新的粒子——中子。

在上世纪已成功建立的粒子物理标准模型中，基本费米子（夸克与轻子）与规范玻色子是基本构成单元，而质子（uud）与中子（udd）并非30年代人们所认为的点粒子。所以方程(1)的本质其实是通过反应 $e + u \leftrightarrow d + \nu_e$ 将一个u-夸克转变为一个d-夸克。实际上，除了核子中含有的u和d价夸克外，总共有6味夸克，并可以根据质量差异分为两组：质量低于GeV的轻味夸克（u, d, s）以及质量超过GeV的重味夸克（c, t, b）。尽管味守恒仅在强相互作用下成立，但弱相互作用无疑会改变夸克的味。这就会产生一个有趣的问题：既然奇异夸克比重夸克容易激发产生，那么大原子核是否奇异数非零呢？

**错误2：**引力是决定大原子核一般属性和整体结构的唯一相互作用。因而Landau认为引力能释放主导，且大原子核是引力束缚的。他曾于1937年写道：“Thus we can regard a star as a body which has a neutronic core the steady growth of which liberates the energy which maintains the star at its high temperature; the condition at the boundary between the two phases is as usual the equality of chemical potential”。

Landau犯下这第二个错误是因为当时未发现强相互作用。强相互作用至少会为大原子核研究带来两方面的重要影响：（1）核能可以通过核反应释放出来，因此核能才是恒星能量的真正来源；（2）如同一般原子核那样，大原子核也可能是通过强相互作用而自束缚的，而非仅仅引力束缚。

总之，对于强相互作用与弱相互作用知识的缺乏导致Landau在20世纪30年代犯下了两个错误。80年后，强力与弱力在核物理、粒子物理以及天体物理中都起到了相当重要的作用，大原子核概念的发展和修正势在必行。我们将在下一节尝试。

### 3 改进的大原子核概念

诚然大原子核的概念逐步发展成为现代中子星模型，但大、小原子核之间确实存在基本差别。在这儿我们考虑两个关键不同点。（1）由于大原子核的尺度远大于小原子核，电子将存在于大原子核的内部（电子的康普顿波长只有 $h/(m_e c) = 0.024\text{\AA}$ ）；（2）由于引力在大原子核中的作用远强于在小原子核中，大原子核的平均密度要高于小原子核的密度（几倍核物质密度）。相较于小原子核而言，这两点不同会使大原子核表现出一些特别之处。关于大原子核，人们很容易会提出这样的问题：那里的夸克依然如重子情形是三个成一集团吗？大原子核会否有奇异数？还处于液态吗？经过多年研究我们认为：为了更好地理解脉冲星类致密天体的各种观测表现，大原子核其实是由以带奇异数夸克集团为基本单元的固态物质组成的 [13]。我们将在第3节与第4节中解释。

致密星内部的真正物态与QCD相图（以温度 $T$ 和重子化学势 $\mu_B$ 为变量）密切相关，后者在核物理与粒子物理界一直是个争论的话题。在低温情况下，由于渐近自由性，重子密度过高的致密物质会从重子相过度到夸克解禁相。但一个极其严肃的问题是：在实际的致密星内部，重子数密度是否会足够高（低）以至于能使夸克解禁（囚禁）呢？

让我们从如下两个方向来考察这一问题。

一个方向是从重子态着手（自下而上的考虑）。我们先假设在脉冲星中的夸克是非解禁的。但是由于刚才谈到的两点不同，这样的非解禁态并不能简单地视为重子物质态。随着大原子核的尺度与密度的增加，轻夸克味对称性将会逐渐得到恢复而终形成 $u$ 、 $d$ 与 $s$ 三味夸克数密度近乎相等的奇异物质。我们知道核子是最重的重子；但如果大原子核内质子和中子数还像小原子核内那样近似相等的话，电子的典型能量将会达到 $10^2\text{MeV}$ 的量级（这一能量已经接近甚至大于 $s$ -夸克与 $u/d$ -夸克间的质量差）。然而，电子数目和能量在奇异物质中却是可忽略的。此外，考虑到强相互作用的存在，具有轻味对称性的大原子核也可能是冷致密物质的基态。进一步地，80年前Landau就注意到，因引力能的释放大原子核会是能量较低的稳定态。因此，在大原子核中或许三味夸克会结合并组成一种新的类似于重子的禁闭态。我们将这种新的强相互作用态称为“夸克集团”。由于它们的质量比较大以及之间的强作用，夸克集团在低温下它会呈非相对论运动并且被局限于晶格附近。

另一个方向是从自由夸克态着手（自上而下的考虑）。在有关低温超核密度物质的QCD相图工作中，类似于Bardeen-Cooper-Schrieffer色超导相的研究占了很大比重 [14]。如果在现实的致密星中夸克之间的耦合确实较弱，以致可用微扰QCD理论进行处理的话，那前述研究便是值得的。微扰QCD结论至少在能标 $1\text{ GeV}$ 以上才是可信的；但实际上，在一般的脉冲星（质量约为 $1.4 M_\odot$ ，半径约为 $10\text{ km}$ ）内部，夸克的化学势却只有大约 $0.4\text{ GeV}$ 。所以致密星中的强相互作用很可能会很强以使夸克成团。记夸克集团尺度为 $l_q$ ，相互作用能量为 $E_q$ 。对于组份夸克质量 $m_q \simeq 300\text{ MeV}$ 的夸克集团，可以用Heisenberg关系估算这两个量：

$$l_q \sim \frac{1}{\alpha_s} \frac{\hbar c}{m_q c^2} \simeq \frac{1}{\alpha_s} \text{ fm}, \quad E_q \sim \alpha_s^2 m_q c^2 \simeq 300 \alpha_s^2 \text{ MeV}. \quad (2)$$

如果相互作用常数 $\alpha_s > 1$ ，那么 $E_q$ 就会接近甚至超过大小约为 $0.4\text{ GeV}$ 的化学势；这对于夸克的

费米气图像而言是极其不利的。而事实上，Dyson-Schwinger方程在接近非微扰QCD时给出的色耦合会非常强；在致密星中的几倍核物质密度下，可达到 $\alpha_s \gtrsim 2$  [13]。因此，致密星内部的夸克很可能成团并局域化。

是故，我们猜想在QCD相图上会存在夸克集团相 [15]。夸克集团相在高温时为液态，但在热运动动能低于夸克集团间的剩余强相互作用能量时变为固态。实际的脉冲星温度较低；因此，作为对Landau大原子核图像的修正，可以认为脉冲星即为固态夸克集团星。夸克集团星与大铁球较为相似，只是后者晶格上是离子/原子核、电磁相互作用主导，前者的则为夸克集团、强相互作用为主。值得注意的是，由于轻味对称性的破缺，s-夸克的数密度要稍少于u/d-夸克。这样奇异夸克集团物质中便存在电子，使得夸克集团星的表面可以存在由正常物质构成的壳层。

夸克集团会是什么样的呢？我们知道 $\Lambda$ 粒子（组成为 $uds$ ）是满足轻夸克味对称性的，人们或许可以认为夸克集团就类似于 $\Lambda$ 粒子。然而， $\Lambda$ 粒子之间的相互作用为吸引势，这会使更多的夸克聚集在一起。受到最近H-双重子（组成为 $uuddss$ ）格点QCD模拟的启发，我们考虑一种由H-集团构成的夸克集团星 [16]。除了能够说明一般的致密星表现外，H-集团星（或者更简单地称之为H星）模型在一定的参数下还能给出极限质量高于 $2M_{\odot}$ 的结果。

## 4 上述修正的观测支持

从脉冲星类天体的观测上来看，一般中子星（旧版的大原子核，但有所发展）与固态夸克集团星（改进版的大原子核）之间最大的区别是什么呢？我们认为有如下两点。

（1）**表面**：在中子星表面，粒子被引力束缚住，而在夸克集团星上，表面的粒子被强力自束缚；（2）**整体结构**：描述整体结构的物态方程的软硬给出不同的极限质量，夸克集团星具有整体刚性而中子星却没有。

表面束缚的不同意味着以下两点：星体的质量-半径（M-R）关系与粒子束缚能。自束缚的夸克集团星的表面密度是非零的，未达到极限重量时其半径会随着质量的增加而增加（特别地，对于低质量夸克集团星，其引力作用可以忽略，可以认为 $M \propto R^3$ ），而对于引力束缚的中子星，其半径会随着质量的增加而减小。SAX J1808.4-3658独特的质量-半径关系或说明了它是一颗夸克星 [17]。不过，直观上看表面的不同应该源于束缚能的差异（下段阐述）。

射电脉冲星是脉冲星类天体的主体。似乎射电子脉冲普遍存在飘移现象；Ruderman-Sutherland 模型很容易解释这些清晰的飘移子脉冲，但该模型依赖于极冠区较高的粒子束缚能以产生间隙火花放电，而中子星模型给出的结合能往往却达不到。由于表面强的自束缚，这一问题在裸夸克集团星图景下会得到自然解决 [18, 19]。除此之外，强的表面束缚会允许极大的能量爆发。这是由于夸克集团星的表面光子/轻子光度不会受到Eddington极限的限制，超新星与 $\gamma$ 射线暴都可能是光子/轻子驱动的 [20, 21, 22]。再者，观测到的死亡脉冲星不含原子谱线的热谱或表明由中子星模型所预言的大气层并不存在，而这一观测特性却与夸克集团星属性相符 [23]。

让我们再来看整体结构上的不同。上一节中已经提到，夸克集团星整体都处于固态（就像“熟鸡蛋”），而一般中子星只有表面的壳层是刚性的（像“生鸡蛋”）。刚体不论是自由转动或

是在力矩作用下转动，都容易产生进动。脉冲星B1821-11 [24]观测上表现出的进动特征以及其他的一些证据表明某些致密星可能是整体刚性的。之前的流体夸克星模型都不能自然地解释脉冲星自转突变现象，而在固态夸克集团星模型中，不论是常规还是缓慢自转突变原则上都能够很好地理解 [25, 26]。星震是固态致密星模型所特有的现象，它在引力能与弹性能释放时发生。星震时释放的能量会成为软 $\gamma$ -射线重复暴与反常X射线脉冲星爆发的能量来源 [27]。

除此之外，我们还注意到夸克集团星的物态方程之所以硬是由于夸克集团的非相对论性而导致的。众所周知，极端相对论性物质的物态方程偏软，而正因如此人们往往认为夸克星具有软的物态、低的极限重量。然而，理论计算 [28, 29]表明：夸克集团星有很大的参数空间容许其极限质量超过 $2M_{\odot}$ ，能自然地理解脉冲星J1614-2230的质量测量值。

有质量远小于H星的H团块（也由H集团组成）吗？对于夸克集团相的计算表明，由夸克集团构成的小团块是可能存在的。如果这些集团是H集团的话，我们可以称它为H团块。我们能够从宇宙线中发现H团块吗？

## 5 总结

80年前，Landau为了解决恒星能源来源的问题，综合了对引力束缚恒星的相关研究与Gamow原子核不可压缩液滴的猜想，提出了巨大原子核的概念。这一概念逐步得到发展，特别是在脉冲星发现之后，成为目前较复杂的标准中子星模型。此外，从天文学的角度，为了解释脉冲星类致密天体的各种观测表现 [30]，我们认为在低温情形、几倍核物质密度下会形成夸克集团态。脉冲星也因而可能是固态夸克集团星。关于这些概念，请见图 1。

最后，让我们借P. W. Anderson (1923-)的一段名言来总结本文：“The ability to reduce everything to simple fundamental laws does not imply the ability to start from those laws and reconstruct the Universe”。对于几倍核物质密度下低温物质状态的研究而言，我们尤为感受尴尬和困惑：那里的基本强相互作用性质（与七大千禧问题之一密切相关）依然还未确定，更不用说“多体问题”了。

## 致谢

在此感谢Sergey Bastrukov博士关于历史及科学方面的讨论，同时感谢北大脉冲星组成员的若干贡献。本工作受到国家自然科学基金会（10935001与10973002）、国家重点基础研究发展计划（2009CB824800）与John Templeton基金会的支持。

## References

- [1] E. Rutherford, Proc. Roy. Soc. A 97 (1920) 374.
- [2] R. H. Stuewer, in George Gamow Symposium, ed. Eamon Harper, W. C. Parke, and David Anderson (ASP Conference Series Vol. 129, 1997), p. 29.

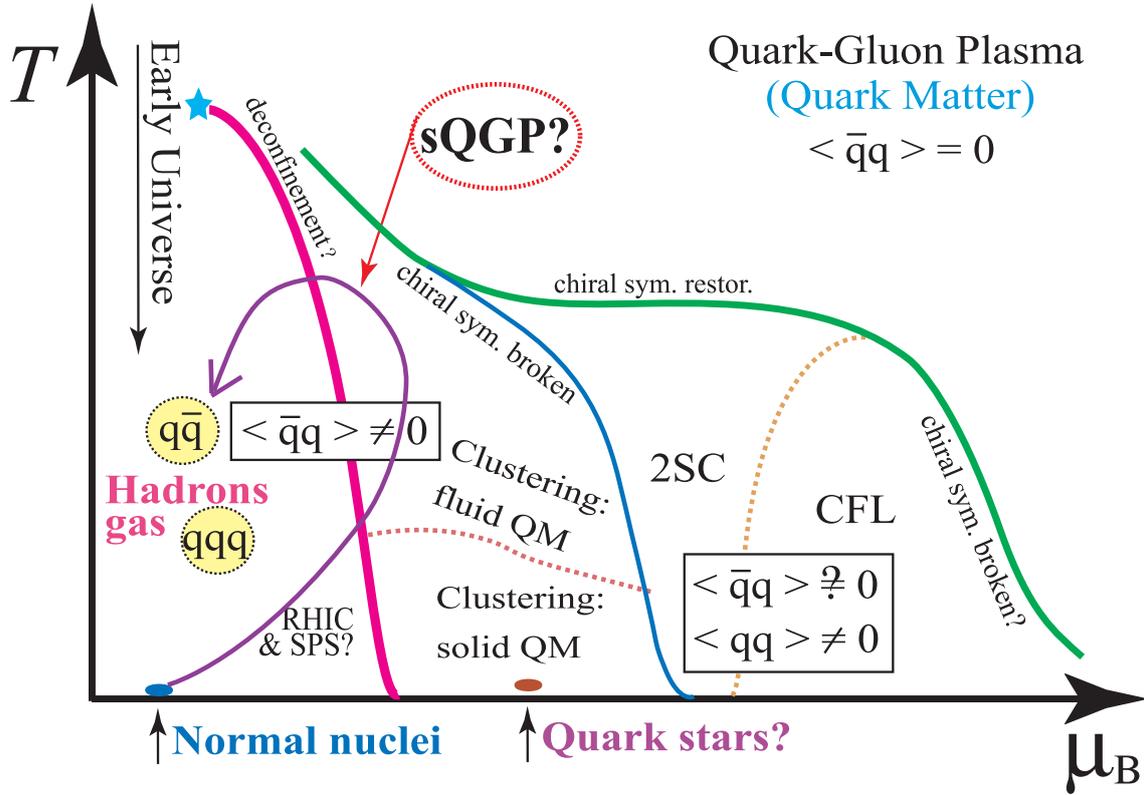


Figure 1: 三类中子星模型（感谢庚君伟提供的绘图）

- [3] G. F. Bertsch, Ann. Phys. 86 (1974) 138.
- [4] L. Landau, Sov. Phys. 1 (1932) 285.
- [5] J. Chadwick, Nat. 129 (1932) 312.
- [6] S. Chandrasekhar, ApJ 74 (1931) 81.
- [7] M. S. Aksenteva, Physics Uspekhi 41 (1998) 621.
- [8] W. Baade, F. Zwicky, Phys. Rev. 46 (1934) 76.
- [9] H. Y. Chiu, Ann. Phys. 26 (1964) 364.
- [10] F. Pacini, Nat. 216 (1967) 567.
- [11] A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, et al. Nat. 217 (1968) 709.
- [12] T. Gold, Nat. 218 (1968) 731.
- [13] R. X. Xu, Int. Jour. Mod. Phys. D 19 (2010) 1437.
- [14] M. G. Alford, K. Rajagopal, T. Schaefer, A. Schmitt, Rev. Mod. Phys. 80 (2008) 1455.

- [15] R. X. Xu, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 36 (2009) 064010.
- [16] X. Y. Lai, C. Y. Gao, R. X. Xu, preprint (arXiv:1107.0834).
- [17] X.-D. Li, I. Bombaci, M. Dey, et al., *Phys. Rev. Lett.* 83 (1999) 3776.
- [18] R. X. Xu, G. J. Qiao, B. Zhang, B., *ApJ* 522 (1999) L109.
- [19] J. Yu, R. X. Xu, *MNRAS* 414 (2011) 489.
- [20] R. Ouyed, R. Rapp, C. Vogt, *ApJ* 632 (2005) 1001.
- [21] B. Paczynski, P. Haensel, *MNRAS* 362 (2005) L4.
- [22] A. B. Chen, T. H. Yu, R. X. Xu, *ApJ* 668 (2007) L55.
- [23] R. X. Xu, *ApJ* 570 (2002) L65.
- [24] I. H. Stairs, A. G. Lyne, S. L. Shemar, *Nat.* 406 (2000)484.
- [25] A. Z. Zhou, R. X. Xu, X. J. Wu, N. Wang, *Astropart. Phys.* 22 (2004) 73.
- [26] C. Peng, R. X. Xu, *MNRAS* 384 (2008) 1034.
- [27] R. X. Xu, *Adv. Sp. Res.* 40 (2007) 1453.
- [28] X. Y. Lai, R. X. Xu, *MNRAS* 398 (2009) L31.
- [29] X. S. Na, R. X. Xu, *Chin. Phys. C* 35 (2011) 616.
- [30] R. X. Xu, *ApJ* 596 (2003) L59.