

# 极端超高能宇宙线的天体起源\*

## 含磁单极的活动星系核模型

彭秋和<sup>1)</sup>

(南京大学天文系 南京 210009)

(中国科学院 - 北京大学联合天体物理中心 北京 100871)

(中国科学院宇宙线和高能天体物理开放实验室 北京 100039)

**摘要** 首先介绍了极端超高能宇宙射线的探测现况和理论研究中的困难. 从作者自己 1985 年前后提出的高速旋转的含磁单极的活动星系核模型出发, 提出极端超高能宇宙线的天体起源的新理论模型. 其核心思想在于利用磁单极催化核子衰变, 产生高能带电粒子. 在 Lorentz 变换下, 含磁单极天体的径向磁场诱导出一直延伸到很远处的电场. 在这个电场的加速下, 荷电粒子(结合一系列物理过程)可以到达  $10^{21}$  eV 的能量. 而且具有同观测相比较的流量.

**关键词** 极端超高能宇宙射线 磁单极 高速旋转的活动星系核

## 1 基本背景: 极端超高能宇宙射线的探测现况及其 GZK 截断问题

### 1.1 超高能宇宙线事件的探测(Olinto, 2000, Biermann, 2001)

近年来, 人们在宇宙射线探测中已经发现极端超高能粒子事件. 仅 AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) 一家探测资料(到 2000 年 5 月为止, 它的累积探测面积为  $4.0 \times 10^{16} \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$ ) 探测到的高能粒子事件数分别为 581 ( $>10^{19}$  eV), 57 ( $>4 \times 10^{19}$  eV) 和 8 ( $10^{20}$  eV) (Takeda et al. 1998; Berezhinskii V S et al. 1990; Abu-Zayyad et al. 1999; Takeda et al. 1999; Afanasiev et al. 1996; Olinto, 2000). 按 P. L. Biermann (2001) 估计,  $E > 10^{20}$  eV (直到  $3 \times 10^{20}$  eV) 的极端超高能粒子事件数目已经探测到 24 个. 而且似乎往高能端尚未发现截断的趋势. AGASA 实验发现, 地球处能量为  $10^{20}$  eV 的高能粒子的流量为  $F(E)$

\* 国家自然科学基金(10173005)和重点基金(核结构和核天体物理(19935030))以及国家教育部博士点基金(2000028417)资助

1) E-mail: qhpeng@nju.edu.cn

$= 4 \times 10^{-30} \text{GeV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . 观测的宇宙射线的能谱为  $N(E) \propto E^{-\gamma}$ . 对  $10^8 \text{eV} < E < 10^{15} \text{eV}$  范围内, 能谱指数  $\gamma = 2.75$  (对质子) 或  $\gamma = 2.65$  (对 He 核和重核); 对  $5 \times 10^{15} \text{eV} < E < 3 \times 10^{18} \text{eV}$ ,  $\gamma = 3.1$ ; 对  $E > 3 \times 10^{18} \text{eV}$ ,  $\gamma = 2$ . 在  $E = 5 \times 10^{15} \text{eV}$  处能谱指数从  $\gamma = 2.75$  转变为更陡的  $\gamma = 3.1$ .

## 1.2 方向性

这些超高能粒子事件基本上是各向同性分布, 而且没有迹象显示出能量超过  $10^{19} \text{eV}$  的超高能粒子事件具有星系的局域分布或趋向于银盘的分布 (Takeda et al. 1999). 银河系磁场和星系际磁场分别约为  $10^{-6} \text{G}$  和  $10^{-9} \text{G}$ ,  $E \sim 10^{20} \text{eV}$  的质子在这种磁场中的回旋半径分别约为  $100 \text{Kpc}$  和  $100 \text{Mpc}$ . 如此高能粒子在星系 (银河系) 磁场或星系际磁场中几乎走直线, 它在传播过程中的偏转不超过几度. 如果超高能宇宙射线是距我们  $50 \text{Mpc}$  以内的天体源产生的质子流, 则这些高能粒子事件的抵达方向应指向它们的天体源. 但是, 在超高能粒子事件的对应方向上, 找不到对应的天体源: 除了少数事件同星系团可能相关外, 绝大多数的超高能粒子事件的方向附近几度范围内没有星系, 超新星遗迹, 中子星或黑洞候选者等可能作为超高能粒子的天体源.

## 1.3 超高能宇宙射线的 GZK 截断问题

如果这些粒子是高能质子, 由于它们同宇宙微波背景光子的作用 ( $p\gamma \rightarrow p\pi^0$ , 即 photopion 过程), 宇宙射线中能量超过  $5 \times 10^{19} \text{eV}$  的质子将会严重损失能量 (损失 20% 能量). 因此, 高能质子在空间中能够行进的最大距离 ( $D_0$ ) 同它的初始能量 ( $E_0(p)$ ) 紧密相关:  $D_0 \sim 20 \text{Mpc} (E_0(p) \sim (1-2) \times 10^{19} \text{eV})$ ,  $50 \text{Mpc} (5 \times 10^{19} \text{eV})$  或  $200 \text{Mpc} (\sim 1 \times 10^{24} \text{eV})$ . 这些超高能质子流不可能来自离我们超过  $50 \text{Mpc}$  以远的距离, 超高能宇宙射线能谱应在  $5 \times 10^{19} \text{eV}$  处截断 (cut-off), 这称为 GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin) 截断 (Greisen, 1966; Zatsepin & Kuzmin, 1966).

如果这些超高能粒子是质子流而且产生它们的天体源在全宇宙均匀分布的话, 那么就会出现这种截断. 最令人惊奇的是: 探测的能量超过  $5 \times 10^{19} \text{eV}$  的超高能粒子事件的流量相当大, 而且没有迹象出现这种 GZK 截断.

## 2 关于极端超高能粒子天体起源的研究现状

就极端超高能宇宙射线的天体起源来说, 迄今人们已经提出的模型主要有两大类:

- 1) Top-Down 模型: 宇宙早期对称性破缺产生拓扑缺陷而遗留下少量残存超重粒子, 它们的衰变产生高能粒子. 这类模型不确定因素太多, 其致命缺点是: 超高能粒子的流量太低.
- 2) Bottom-Up 模型: 认为粒子的初始能量虽不高, 但是经过了某种特殊的加速过程使粒子被加速到如此高的能量. 人们采用的想法是: 在天体等离子体内, 当大尺度宏观

运动(例如, 激波, 湍流)的能量或磁场的能量被转移到单个粒子上, 这就会使宇宙线加速. 加速机制为Fermi加速, 激波加速和等离子体湍动加速的联合作用. 被加速粒子所可能达到的极大能量估计为:  $E_{\max} \sim Z_e BL$  ( $Z_e$ 为荷电粒子的电荷,  $L$ 为加速区域的尺度,  $B$ 为磁场强度). 对  $E_{\max} \sim 10^{20}$  eV, 具有合理的乘积  $BL$  的天体源有(取  $Z \sim 1$ ): 中子星, 活动星系核, 射电星系和星系团.

已经提出的这类超高能宇宙线天体起源模型大致有: a) ISM-SN模型: 超新星爆发抛射的能量较高的带电粒子在星际介质中被加速. 粒子可加速到  $100 Z$  TeV ( $\text{TeV} = 10^{12}$  eV). b) wind-SN模型: 超新星爆发抛射的能量较高的带电粒子注入到该超新星爆发前的前身星的强大星风中加速. 粒子可加速到  $100 Z$  PeV以上 ( $\text{PeV} = 10^{15}$  eV). 它可能对直到  $3 \times 10^{18}$  eV 的各种能量的高能宇宙线都有重要贡献. c) 射电星系的热斑模型(Hillas 1984, Biermann & Strittmatter, 1987): 据估计, 它可使质子和电子加速到  $10^{21,22}$  eV. 但它存在着难以解决的问题: 1) 邻近 ( $D \sim 50$  Mpc) 范围内射电星系不多. 最有效的是 M87,  $D = (15 - 20)$  Mpc. 它几乎是能够提供足够功率的唯一射电星系(另两个射电星系: CenA 太弱, NGC 315 太远). 这同极端超高能宇宙线方向基本各向同性明显不符. 2) 为了解释极端超高能宇宙线方向并未指向有关天体, 也未指向 M87 和其它射电星系, Biermann 假设这些强射电星系的磁场强度达到  $10^{-2}$  Gauss, 比从其它观测估计的公认值要高一千倍. d) 新生毫秒脉冲星模型(Blasi, Epstein and Olinto, 2000): 具有超强磁场并且高速旋转的年轻脉冲星产生极端超高能宇宙线的模型. 它的关键假设是: 在脉冲星星风加速区域内, 大部分磁场能量都被转化为星风中粒子流的动能. 这同磁重联过程中磁场能量转化为粒子动能的效率低于 (0.1—0.01)% 这个公认的观念相违背. e) 铁质小行星同中子星碰撞模型(Litwin and Rosner, 2001): 基本假设是, 一个铁质小行星在同中子星碰撞过程中变得粉碎(全部成为气态等离子体), 横向穿越磁力线时, 在 Lorentz 力相应的等效电场加速下, 可以把质子加速到  $E \sim 10^{20}$  eV 以上. 这种假设和估算的人为性太高, 难以认为是可信的.

对上述这些天体来说, 即迄今尚没有比较合理的有效加速机制能加速到如此高的能量(Blandford 2000; Bhattacharjee & Sigl, 2000; Venkatesan, Miller and Olinto 1997).

### 3 含磁单极活动星系核模型

按照大统一理论, 磁单极可以催化核子衰变:  $p \rightarrow \pi^0 + e^+$  (85%) 或  $p \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  (15%), 截面约为  $\sigma \sim 10^{-25} - 10^{-26} \text{cm}^2$  (Rubakov 1983, Callan 1982). 这种效应简称为 RC 效应. 以它作为天体的主要能源, 我们曾提出过一种含磁单极活动星系核模型(Peng, Li and Wang, 1985; 彭秋和, 王德焯, 李宗云, 1986; Peng, 1989; Peng and Chou, 1998; Peng, 2000; Peng and Chou, 2001). 按照我们的观点, 宇宙中可能存在一类包含着饱和数量磁单极的超巨质量 ( $10^6 - 10^{10} M_\odot$ ) 天体, 它们作为类星体或活动星系核的一种模型. 在宇宙早期的高温等离子体环境下(磁单极同物质作用较强), 通过引力坍缩形成的活动星系核这种巨型天体可能含有足够数量的磁单极, 其磁单极含量可以达到其饱和值(Peng 1989),  $\zeta \leq \zeta_s$ , 其中  $\zeta \equiv N_m / N_B$  为磁单极数目同重子数目之比.  $\zeta_s$  为天体的饱和磁单极含量

值,  $\zeta_s = \zeta_n(1 - R_g/R)^{-1/2}$  ( $R \gg R_g$ ) 或  $\zeta_s = \zeta_g \sqrt{R/R_g}$  ( $R \sim R_g$  or  $R \leq R_g$ ) where  $R_g$  为天体的 Schwarzschild 半径,  $R_g = 2GM/c^2$  ( $M$  是天体的质量).  $\zeta_g = 214\zeta_n$ ,  $\zeta_n$  为天体的牛顿饱和磁单极含量,  $\zeta_n = Gm_B m_m / g_m^2 \approx 1.9 \times 10^{-25} (m_m / 10^{16} m_B)$ . 这种活动星系核可以是黑洞(如果质量非常巨大), 但可能不是黑洞. 即使是黑洞, 一个旋转的含磁单极天体的黑洞视界半径为

$$r^h = \frac{1}{2} R_g \{1 + [1 - 4(a^2 + \kappa Q^2) / R_g^2]^{1/2}\} \text{ (Peng 1989),}$$

其中  $\kappa \equiv G/c^4$ ,  $Q^2 = Q_e^2 + Q_m^2$ ,  $Q_e$  和  $Q_m$  分别是天体的总电荷量和总磁荷量.  $a$  为比角动量参量,  $a \equiv (J/Mc) \approx \alpha (GM/c^2)$   $J$  是天体的角动量.  $J \approx MR^2 \Omega$ ,  $\Omega$  是天体的转动角速度. 对于高速旋转的黑洞来说, 它同极端 Kerr 黑洞角动量的比值为  $\alpha$  ( $0.1 < \alpha < 1$ ). 当天体的磁单极含量超过某一个临界含量  $\zeta_c$  时, 它可能坍缩到其半径小于 Schwarzschild 半径 ( $R_g$ ), 但是却不会出现视界 (Peng 1989). 其中,

$$\zeta_c = \zeta_{c0} (1 - 4a^2 / R_g^2)^{1/2}, \quad \zeta_{c0} \equiv \sqrt{Gm_B / g_m} = 4.365 \times 10^{-21},$$

它们可能旋转得非常快, 其角动量接近甚至达到极端 Kerr 黑洞的角动量. 这时, 由于核子在磁单极催化下 Rubakov-Callen 效应, 星体中心物质密度不会出现无穷大, 因而也不会发生经典广义相对论中难以克服的裸奇点问题.

## 4 高速旋转的含磁单极超巨型天体的加速机制及其物理过程

### 4.1 加速机制及其物理过程 (Peng and Chou, 2001)

在这类高速旋转的致密天体, 其角速度为

$$\Omega \sim \alpha \frac{GM}{cR^2} \sim \frac{\alpha R_g}{2R} \frac{c}{R},$$

在其表面赤道上, 旋转线速度非常大, 达到  $V(R) = \frac{\alpha R_g}{2R} c$ . 这时将会出现一种非常有趣

的物理效应: 在随体旋转参考系中的观察者(它随着天体一起转动)来看, 含磁单极天体的磁场是径向的. 通过 Lorentz 变换, 处于静止参考系中观测者则发现该天体内外存在着相当强的电场. 由 Lorentz 变换诱导的电场强度可以非常强大, 其方向同场点的位置有关, 一般并不沿径向. 在赤道圈上这种诱导电场最大, 其方向与天体旋转轴方向相同. 根据 Lorentz 变换, 径向磁场同时也被大大地增强. 若取这种高度坍缩 ( $R \approx R_g$ ) 超巨质量天体(类星体与活动星系核)的质量为  $1.0 \times 10^8 M$ , 可以估算  $B(R) \sim 10^6 - 10^8$  Gauss (Peng and Chou, 2001). 由 Lorentz 变换诱导的电场强度随着离天体的距离增长而按  $r^{-2} - r^{-3}$  规律减

弱，但一直延展到相当远的距离它上仍然相当强大。

由于RC效应从天体内产生出来的粒子( $e^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\mu^+$ )具有的初始能量一般就有几百MeV. 在上述Lorentz变换的感应电场作用下, 带电粒子 $e^+$ ,  $\mu^+$ 在天体表面附近很快就会加速到 $10^8$ — $10^9$ GeV以上. 随后通过一系列物理过程产生更多种类的能量较高的粒子. 例如, 通过 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ ,  $\pi^0 \rightarrow 3\gamma$ 以及正电子同背景物质中的电子湮没转化为高能光子对... 但是, 最有效的过程是在磁场下正电子的同步辐射. 其辐射功率为

$$P=1.6 \times 10^{-15} \gamma^2 \beta^2 B^2 \sin^2 \alpha \text{ egs/s.}$$

相对论电子大部分辐射是在峰值频率 $\nu_m$ 附近发出的,

$$\nu_m \approx \nu_L \gamma^2 \sin \alpha \text{ (Hz)} \approx 1 \times 10^{13} B E^2 \text{ GeV}(e^+) \sin^2 \alpha \text{ (Hz),}$$

其中  $2\pi \nu_L = \omega_L = \frac{eB}{m_e c}$ ,  $\alpha$  为正电子的速度与磁场的夹角. 这些高能同步辐射的光子能量为

$$E_\gamma = h \nu_m \approx 4 \times 10^2 (B/10 \text{Gs}) [E(e^+)/10^6 \text{GeV}]^2 \text{ GeV.}$$

这些高能同步辐射的光子会同天体外背景热光子湮没产生质子与反质子  $\gamma_c + \gamma_{th} \rightarrow p + \bar{p}$  (当  $E_\gamma \cdot E_{th} > (m_p c^2)^2$ ), 其湮没截面为  $\sigma \approx \sigma_T (m_e/m_p)^2 (m_p c^2)^2 / (E_\gamma \cdot E_{th})$ . 产生出来的质子与反质子在向外飞行的相当长时间内都将受到高速旋转的磁单极天体外的(Lorentz变换诱导的)电场作用下进一步加速, 有可能加速到极高的能量.

根据旋转的荷电荷磁相对论天体的外部度规 (KNK 度规, Kerr-Newman-Kasaya 度规, Kasaya, 1982), 从广义相对论中 Einstein-Maxwell 方程出发可以求解电磁场. 其四维电磁势为

$$A_0 = -Q_e \frac{r}{\rho^2} + Q_m \frac{a \cos \theta}{\rho^2}, A_r = A_\theta = 0, A_\phi = Q_e \frac{ar \sin^2 \theta}{\rho^2} + Q_m \left\{ \pm 1 - \cos \theta \frac{r^2 + a^2}{\rho^2} \right\},$$

其中  $\rho^2 = r^2 + a^2 \cos^2 \theta$ . 被加速的带电粒子获得最大能量为

$$E_{\max} = e A_0 = e Q_m \frac{a \cos \theta}{r^2 + a^2} \approx e Q_m / R_g = 2.4 \times 10^{22} \text{ eV.}$$

这样, 我们的模型提供了产生极超高能宇宙射线的一种可能的天体起源机制.

## 4.2 理论流量估算和同实测对比

磁单极催化核子衰变的反应率为

$$r_{RC} = N_B N_m c \langle \sigma \beta \rangle = 10^{-27} c N_A^2 \zeta_n \left( \frac{M}{4\pi R^3 / 3} \right)^2 \eta,$$

其中  $\eta = \frac{\zeta}{\zeta_n} \frac{\langle \sigma \beta \rangle}{10^{-27} \text{cm}^2}$ , 单位时间产生正电子的数目:

$$S_{e^+} = \frac{4\pi}{3} R^3 r_{RC} = 7.5 \times 10^{47} M_8^{-1} y^{-3} \eta, \left( y \equiv R/R_g = \frac{c^2 R}{2GM} \right).$$

一个正电子运动一段距离后, 所能产生的高能同步加速辐射光子数目

$$dn_{\gamma} \sim \frac{\bar{P}dt}{h\nu_m} = 5.5 \times 10^4 H(R) \frac{R^2}{r^2} dt,$$

而含磁单极天体表面磁场强度为

$$H(R) = \frac{Q_m}{R^2} = 2.55 \times 10^6 M_8^{-1} y^{-2}.$$

积分后有  $n_{\gamma} \sim 1.4 \times 10^{14} y^{-1}$ . 单位时间产生的全部正电子所能产生的高能光子数目为

$$N_r = (S_{e^+} \cdot \Delta t) \cdot n_{\gamma} / \Delta t = 1.0 \times 10^{62} M_8^{-1} y^{-4} \eta.$$

一个高能光子同一个背景热光子碰撞产生质子, 反质子的反应截面为

$$\sigma(E_1, E_2) = \frac{\pi r_{0p}^2}{2} (1 - \beta^2) [2\beta(\beta^2 - 2) + (3 - \beta^4) \ln(\frac{1 + \beta}{1 - \beta})] \sim \sigma_1 \left(\frac{m_e}{m_p}\right)^2 \sim 3.7 \times 10^{-32} \text{ cm}^{-2},$$

$$\left( \beta = \left[ 1 - \frac{(mc^2)^2}{E_1 E_2} \right]^{1/2} \right),$$

而热光子的数密度为

$$n_{th} = aT^4 / (5kT) \sim 10T^3 \text{ cm}^{-3},$$

由此, 在单位时间内产生的高能质子数为

$$N_p = N_{\gamma} n_{th} \langle \sigma c \rangle V = 3.9 \times 10^{31} c T^3 M_8^{-1} y^{-4} \eta.$$

在磁单极天体表面以外不远处, 取  $T \sim 100\text{K}$ , 则

$$N_p = 3.9 \times 10^{37} M_8^{-1} y^{-4} \eta.$$

假设该天体离地球 20Mpc, 那么地球上的辐射强度约为  $f \sim \frac{N_p}{4\pi D^2}$ . AGASA 的探测截面

约为  $100\text{km}^2$ , 预测流量为

$$S \sim \frac{N_p}{4\pi D^2} A \sim 7.5 \times 10^{-4} M_8^{-1} y^{-4} \eta \sim 7.5 \times 10^{-8} \text{ (如果 } y \sim 10 \text{)}.$$

考虑到 50Mpc 范围内大约有  $10^3$ — $10^4$  个 AGN. 如果采用我们的上述模型, 则相应的总流量大约为  $S_{\text{total}} \sim 10^{-5}$ . AGASA 探测的流量为  $S_{\text{obs}} = 600/10y \sim 10^{-6}$ . 因而, 上述模型产生的极端超高能宇宙线的流量是足够的.

**参考文献 (References)**

- 1 Abu-Zayyad T et al. In: Proc. 26th Int Cosmic Ray Conf. Salt LakeCity, **3**: 264
- 2 Afanasiev B N et al. In: Proc. Extremely High Energy Cosmic Rays, ed. M. Nagano , Tokyo Press, 1996, 32
- 3 Berezhinskii V S et al. Astrophysics of Cosmic Rays (Amsterdam: North-Holland), 1990
- 4 Bhattacharjee P, Sigl G. Phys. Rep., 2000, **327**: 109
- 5 Blandford R D. In: Particle Physics and the Universe, ed L. Bergstrom, P. Carlson and C. Franss, Singapore: World Scientific, 2000
- 6 Blasi P, Epstein R I, Olinto A V. ApJ., 2000, **533**: L123
- 7 Biermann P L. In: Proceedings of thre international Workshop on Obsreving Ultra-High Energy Cosmic Ray from Space and Earth, August 2000, Mettepec, Puebla, Mexico. 2001, press
- 8 Biermann P L, Strittmatter P A. ApJ., 1987, **322**: 643
- 9 Callan C. Phys.Rev., 1982, **D25**: 2141
- 10 Greisen,K, Phys. Rev. Lett., 1966, **16**: 748
- 11 Hillas A M. Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1984, **22**: 425
- 12 Kasuya M. Phys. Rev., 1982, **D25**: 995
- 13 Litwin C, Rosner R. 2001, astro-ph/0104090
- 14 Olinto A V. 2000, astro-ph/0002006
- 15 PENG Q H. Astrophysics and Space Science, 1989, **154**: 271
- 16 PENG Q H. In: High Energetic Physical Processes and Mechanism for Emission from Astrophysical Plasmas, IAU Symposium, 2000, **195**: 421
- 17 PENG Q H, CHOU C K. Astrophys. Space Science, 1998, **257**: 149
- 18 PENG Q H, CHOU C K. ApJ, 2001, **551**: L23
- 19 PENG Q H, LI Z, WANG D Y. Scientia Sinica, 1985, **28**: 970
- 20 彭秋和, 王德焯, 李宗云. 天体物理学报, 1986, **6**: 249
- 21 Rubakov V. Nucl. Phys., 1983, **B218**: 240
- 22 Takeda M et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**: 1163
- 23 Takeda M et al. ApJ., 1999, **522**: 225
- 24 Venkateson A, Miller M C, Olinto A V. ApJ., 1997, **484**: 323
- 25 Zatsepin G T, Kuzmin V A. Sov. Phys. JETP Lett., 1966, **4**: 78

## Where Do the Extra High Energy Cosmic Rays Come From<sup>\*</sup> A Model of Active Galactic Nuclei With Magnetic Monopoles

PENG Qiu-He<sup>1)</sup>

(Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

(Joint Astrophysics Center of CAS -Beijing University, Beijing 100871, China)

(The Open Laboratory for Cosmic Ray and High Energy Astrophysics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** The origin and signature of ultra high-energy cosmic rays are still somewhat mysterious. In this paper, we present an effective acceleration mechanism for such ultra high-energy events based on supermassive stellar objects with saturation of magnetic monopoles of 't Hooft-Polyakov type in the universe. Catalyzed by magnetic monopoles, nucleons may decay to energetic charged particles and radiation, and can travel to great distance from their source because of the absence of horizon and central singularity of these supermassive stellar objects, due to Rubakov-Callan effect. These rapid rotating collapsed objects have radial magnetic fields in the local co-rotating frame. The induced electromagnetic fields in the rest frame are quite different from that of the usual dipole fields. The strength of such induced fields are very strong and decrease with the square of distance. As a result, the energetic charged particles released during nucleon decay may be further accelerated for a rather long period and the resulting energy of such cosmic rays may be far beyond  $10^{21}$  eV.

**Key words** ultra high-energy cosmic rays, super massive stellar objects, magnetic monopoles

---

<sup>\*</sup> Supported by National Natural Science Foundation of China (10173005, 19935030) and Director Foundation of National Education Ministry (2000028417)

1) E-mail: qhpeng@nju.edu.cn