

封面文章

HADAR 实验对活动星系核伽马射线辐射观测
的预期研究*

钱祥利¹⁾²⁾ 孙惠英¹⁾ 陈天禄^{2)†} 单增罗布²⁾ 冯有亮²⁾ 高启²⁾
苟全补³⁾ 郭义庆^{3)4)‡} 胡红波³⁾⁴⁾ 康明铭⁵⁾ 厉海金²⁾ 刘成³⁾
刘茂元²⁾ 刘伟³⁾ 乔冰强³⁾ 王旭¹⁾ 王振⁶⁾ 辛广广⁷⁾
姚玉华⁸⁾³⁾ 袁强⁹⁾ 张毅⁹⁾

1) (山东管理学院智能工程学院, 济南 250357)

2) (西藏大学宇宙线教育部重点实验室, 拉萨 850000)

3) (中国科学院高能物理研究所粒子天体物理中心, 北京 100049)

4) (中国科学院大学, 北京 100049)

5) (四川大学物理学院, 成都 610064)

6) (上海交通大学李政道研究所, 上海 200240)

7) (苏州空天信息研究院, 苏州 215000)

8) (重庆大学物理学院, 重庆 401331)

9) (中国科学院紫金山天文台暗物质与空间天文重点实验室, 南京 210023)

(2022 年 10 月 16 日收到; 2022 年 11 月 9 日收到修改稿)

HADAR (High Altitude Detection of Astronomical Radiation) 是一个基于大气切伦科夫成像技术的地面望远镜阵列, 其采用大口径折射式水透镜系统来收集大气切伦科夫光, 以实现 10 GeV—10 TeV 能量段的伽马射线和宇宙线的探测. HADAR 具有低阈能和大视场的优势, 因此可以对天区进行连续扫描和观测, 在观测活动星系核 (Active Galactic Nuclei, AGN) 等银河系外伽马射线源方面具有明显优势. 本文研究了 HADAR 实验对 AGN 的探测能力. 基于费米望远镜 (Fermi Large Area Telescope, Fermi-LAT) 的 AGN 源能谱信息, 将观测能量外推至甚高能能段, 同时加入河外背景光的吸收效应, 以计算 HADAR 对 AGN 源观测的统计显著性. 研究结果显示, HADAR 运行一年时间, 预计将有 31 个 Fermi-LAT AGN 源以高于 5 倍显著性被观测到, 其中大部分为蝎虎状天体类型.

关键词: HADAR, 大气切伦科夫望远镜, 活动星系核, 显著性

PACS: 95.55.Ka, 95.55.Cs, 29.40.Ka, 98.70.Rz

DOI: 10.7498/aps.72.20221976

1 引言

甚高能 (very high energy, VHE; $E \geq 30$ GeV) 伽马射线是宇宙中最高能现象的主要信使. 在银河

系外, VHE 伽马射线被认为主要来自粒子在超大质量黑洞中产生的相对论性喷流中的辐射, 可以用来理解相对论性喷流的物理过程、粒子加速机制以及伽马射线与低能光子场的相互作用过程, 因此 VHE 伽马射线天文提供了目前来说最直接的探索

* 国家自然科学基金 (批准号: 12263005, 11873005, 11705103, 12005120, 12147218, U1831208, U1632104, 11875264, U2031110) 和西藏大学宇宙线教育部重点实验室开放基金 (批准号: KLCR-202201) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chentl@ihep.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: guoyq@ihep.ac.cn

宇宙中非热天体物理过程的手段之一.

活动星系核 (active galactic nuclei, AGN) 是目前实验观测到的最活跃的天体之一, 在整个电磁频谱中均有非热连续谱辐射, 从无线电波长到 VHE 伽马射线频率, 且呈现分段幂率谱的形式, 因此是河外宇宙线的重要候选源之一. 在 VHE 能段, 大部分产生伽马辐射的河外源是耀变体. 耀变体是一类活动性较强的 AGN, 通常伴随着相对论性的喷流, 目前普遍的看法是一个旋转的中心黑洞提供能量来源, 沿着喷流方向将能量传输到多个辐射区域. 对耀变体的观测可以为其能量和加速机制研究提供重要帮助.

耀变体的一个重要特征是在各个波段都表现出强的流强变化特点. 在耀发期间, 在甚高能段其流强已经被观测到有一个量级幅度的变化, 并且时间跨度从数分钟到数月不等^[1,2]. 耀变体的谱能量分布 (spectral energy distribution, SED) 具有双峰结构, 低能峰处于射电到 X 射线波段, 是由于相对论电子引起的同步辐射. 而高能峰处于 X 射线到 TeV 波段, 其辐射机制可能是轻子起源, 比如加速的电子通过逆康普顿散射从喷流或外部区域产生^[3]; 也可能是强子过程, 比如喷流中加速的质子产生 π^0 并衰变成伽马射线^[4]; 或者是两种过程都有^[5,6]. 不同类型和光度的耀变体, 同步辐射峰的位置不同, 其特点是辐射光度与同步辐射峰频率位置反相关^[7], 同时有研究表明第二个峰也可能遵循相同的趋势^[8]. 根据光谱中光谱发射线的特点, 耀变体可以分为蝎虎状天体 (BL lacertae objects, BL Lacs) 和平谱射电类星体 (flat spectrum radio quasars, FSRQs). BL Lacs 在其光谱中没有显示出强发射线, 而 FSRQs 则显示出强发射线. 根据同步辐射峰在 SED 中的位置, 将 BL Lacs 天体划分为 LBLs (low-frequency peaked BL Lacs), IBLs (intermediate-frequency peaked BL Lacs) 和 HBLs (high-frequency peaked BL Lacs)^[9]. LBLs 同步辐射峰的频率一般小于 10^{14} Hz, IBLs 同步辐射峰的频率处于 10^{14} — 10^{15} Hz 之间, HBLs 同步辐射峰的频率大于 10^{15} Hz.

近些年, 随着探测技术的发展, 人类探测伽马射线源的能力有了巨大进步. 现在已经发现的 VHE 伽马射线源已超过 250 个, 包括河内源和河外源, 其中河外源主要包括 AGN、伽马射线暴^[10]

和星暴星系, 伽马射线主要来源于它们产生的相对论性喷流. 这得益于大型地面阵列实验, 包括成像大气切伦科夫望远镜实验 (imaging atmospheric Cherenkov telescopes, IACTs, 例如 H.E.S.S.^[11], MAGIC^[12], VERITAS^[13]) 和地面空气簇射阵列实验 (extensive air shower detector array, EAS, 例如 HAWC^[14] 和 LHAASO^[15]) 的观测. 同时, 具有杰出探测性能的下一代切伦科夫望远镜阵列实验—CTA^[16] 也即将展开. 最早发现的河外伽马射线源是 Whipple 实验发现的 Mrk 421^[17] 和 Mrk 501^[18], 它们都属于 HBL 耀变体. 根据 TeVCat 源表^①统计, 81 个耀变体中 68% 属于 HBL 类型, 其次是 IBL 类型. 此外, 最遥远的 VHE 耀变体是 FSRQ 类型, 目前仅有 9 个 FSRQs 被 IACTs 探测到. 3C 279 是第一个被观测到的 FSRQ, 红移为 0.536, 由 MAGIC 实验在 2007 年发现^[19]. 最远的耀变体为 S3 0218+35, 红移为 0.954. 随着 IACTs 灵敏度的提高, 除了处于稳态和高态期的耀变体被探测到外, 很多处于低态期的耀变体也被探测到. 例如 HBLs RBS0413^[20], 1ES 0414+009^[21], 1ES 1312-423^[22] 以低于 1% 蟹状星云 (crab nebula) 的流强被探测到. 在流强变化的时间尺度上, 大部分耀变体以天的时间尺度变化, 例如 Mrk 421^[23], 以小时或分钟时间尺度的流强变化往往在高态时才被探测到, 例如 Mrk 501^[24], PKS 1510-089^[25] 和 BL Lac^[26]. 在 PKS 2155-304^[1] 中甚至测到了百秒量级时间周期的流强变化.

虽然目前观测到的大部分 VHE 源是基于 IACTs, 但是由于 IACTs 实验具有窄视场 (3.5° — 5°) 和低占空比 ($< 10\%$) 的特点, 不能覆盖大的天区面积, 因此只能对单一的源进行监测. 同时, 对于宇宙中的剧烈爆发现象, 如伽马射线暴、超新星爆发等, 这类暂现源或瞬变源持续时间较短, IACTs 虽然有着很好的灵敏度和角度分辨率, 但是由于受视场的限制, 不能对这些源进行快速响应, 因而也不能很好地观测; 而 EAS 阵列虽然有大的探测面积和全天视场, 可以进行连续观测, 但观测阈能比较高 (一般在几百个 GeV), 对低能的伽马辐射不能很好地探测, 且角分辨率相对较差. 另一方面, 像 Fermi 卫星这类空间探测器, 虽然能够连续扫描大的天区, 然而由于探测器面积的限制, 主要是对低能段进行观测.

① <http://tevcat.uchicago.edu/>

基于此, 一个具有低阈能、大视场的地面实验阵列——高海拔天体辐射探测实验 (high altitude detection of astronomical radiation, HADAR) 被提出并开展. HADAR 是一个基于大气成像切伦科夫技术的折射式地面望远镜阵列, 通过大口径广角水透镜 (透镜+纯水) 系统来收集大气切伦科夫光信号以实现 VHE 宇宙线和伽马射线的观测. 它的主要科学目标之一就是高精度观测 10 GeV—10 TeV 的伽马射线源, 包括点源、暂现源及时变源.

基于 HADAR 实验, 我们可以连续监测视场天区范围内的任何源, 这可以对耀变体的耀变行为进行连续观测和研究. 研究耀变的频率和变化的时间尺度以用来限制辐射区域的大小, 研究能谱结构来探究喷流中的最高能量, 研究喷流的辐射机制等 [27,28]. 除此之外, 以高灵敏度进行大视场的扫描将会增加从已有的和新的河外源中发现明亮耀变事例的机会, 这可以用来限制和测量河外背景光 (extragalactic background light, EBL) [29,30,31] 以及研究高红移下的宇宙磁场 [32] 等.

本文利用 HADAR 实验阵列对 AGN 的观测进行预研. 文章的结构为: 第 2 章简单介绍 HADAR 实验及其基本性能, 第 3 章基于当前 Fermi-LAT 的观测数据外推在 HADAR 能量范围内 AGN 的能谱, 第 4 章进行 AGN 观测显著性的估计, 第 5 章是总结与讨论.

2 HADAR 实验

HADAR 实验是一个由 4 面大口径广角水透

镜和周围的闪烁体探测器组成的复合阵列, 主要是观测宇宙线和伽马射线在大气中产生的切伦科夫光, 阵列结构如图 1(a) 所示. 水透镜与周围塑料闪烁体阵列 (西藏羊八井复合阵列 [33]) 联合进行观测, 4 面水透镜按间距为 100 m 排列为正方形. 图 1(b) 展示了单个广角水透镜的详细设计, 主要由直径 5 m 的半球形球罐透镜、圆柱形金属罐体和底部的成像系统组成. 透镜主要作为切伦科夫光收集器. 罐体的半径为 4 m、高为 7 m, 罐体内充满高纯水, 以提高对紫外光子的透射率. 罐体内部附有吸收材料, 外部附有绝热材料. 成像系统由 18961 个 2 in 的光电倍增管排列而成, 放置在透镜的焦平面上, 以实现成像的数字化. 成像系统设计为弧面以实现大角度入射光子的成像, 系统由不锈钢支架支撑, 透镜的焦距为 6.8 m. 该水透镜结构的设计可以实现大的观测视场, 如图 1(b) 所示, 边缘入射的平行光被聚焦在成像系统的边缘, 使整个视场角达到 60° . 同时, 水透镜作为一项新的透镜技术, 采用了廉价的亚克力材料和高纯水作为基本材料, 成本相对较低, 且易于后期维护.

图 2 给出了模拟得到的不同天顶角伽马事例入射时 HADAR 的角分辨图 (点扩展函数, 68% 包容半径), 入射天顶角分别为 10° , 20° 和 30° , 能量范围从 10 GeV 到 10 TeV, 可以看出在 300 GeV 时角分辨约为 0.4° [34]. 图 3(a) 展示了 HADAR 的有效面积及与 IACTs 和 EAS 实验的对比. 可以看出, 随着能量的增加, 有效面积从约 10 m^2 增加到 $4 \times 10^5 \text{ m}^2$, 在 300 GeV 时有效面积约为 $1 \times 10^5 \text{ m}^2$, 跟 H.E.S.S. [35], MAGIC [36] 和 LHAASO [37] 实验的接

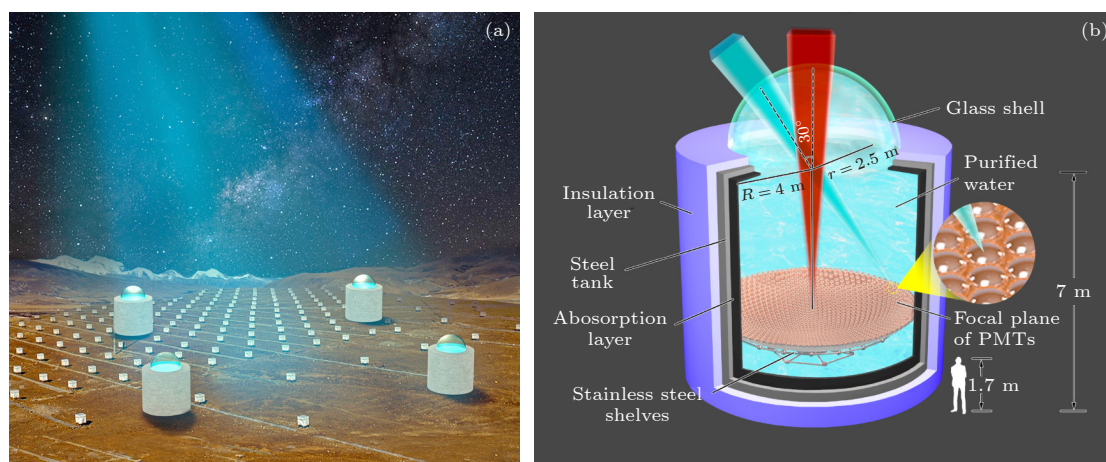


图 1 HADAR 阵列示意图 (a) 阵列分布图; (b) 单个水透镜详细结构图 [34]

Fig. 1. Schematic of HADAR: (a) Layout of the HADAR experiment; (b) detailed design of a water-lens telescope [34].

近且远大于 HAWC^[38] 实验. 在低能段 (<300 GeV) HADAR 实验的有效面积略差, 是因为 HADAR 实验望远镜的直径只有 5 m, 收集到的切伦科夫光子数要少一些. 对不同天顶角入射事例, HADAR 有效面积差别不大. 图 3(b) 是各个实验有效孔径 (有效面积与视场立体角的积分) 的比较, 可以看出, HADAR 实验覆盖的天区面积远大于 IACTs 等实验, 甚至是 CTA 实验. 基于此优势, HADAR 可以在北天区巡天观测伽马射线源.

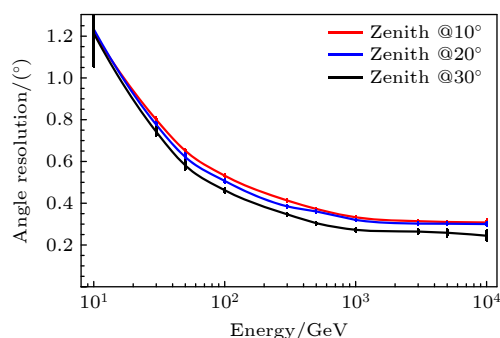


图 2 HADAR 实验的角分辨, 入射事例的天顶角分别为 10° , 20° 和 30° ^[34]

Fig. 2. Performance of HADAR angular resolution. The incident zenith angles are 10° , 20° and 30° ^[34].

图 4 是 HADAR 实验对 Crab 5 倍显著性的灵敏度曲线, 为了更好地与其他实验对比, Fermi, MAGIC, H.E.S.S., ARGO-YBJ, HAWC, Tibet-AS γ , LHAASO 和 CTA 等实验的灵敏度曲线也在图中标出. 其中, IACTs 实验的曝光时间为 50 h, EAS 实验的曝光时间为一年, HADAR 实验的运行时间为一年. 从图 4 可以看出, HADAR 实验在其能量范围的观测灵敏度要好于地面 EAS 实验, 在 1 TeV 处灵敏度接近于 1% Crab 流强, 与 MAGIC 和 H.E.S.S. 实验的灵敏度相当. 虽然该灵敏度没有超过 MAGIC 和 H.E.S.S. 等实验, 但 HADAR 实验具有反射式切伦科夫望远镜没有的宽视场优势, 这十分有利于对点源、瞬变源及爆发源的观测. LHAASO 是 1 TeV 以上能区灵敏度最高的 EAS 实验, 能量主要集中在高能段, LHAASO 对 AGN 观测的预期可以参看文献^[39].

实验进展方面, 2016 年, 0.9 m 口径的原型水透镜样机在西藏羊八井宇宙线观测站 (海拔 4300 m, 东经 90.522° , 北纬 30.102° , 对应大气深度 606 g/cm^2) 成功运行, 并与闪烁体探测器阵列联合第一次成功探测到了宇宙线事例^[40]. 对原型

样机的性能及详细描述请参看文献^[41], 实验结果表明该探测技术对大气切伦科夫光具有较好的成像能力. 在第一步实验成功后, 我们又进行了第二步的实验计划, 即用两个或三个直径 1 m 的半球

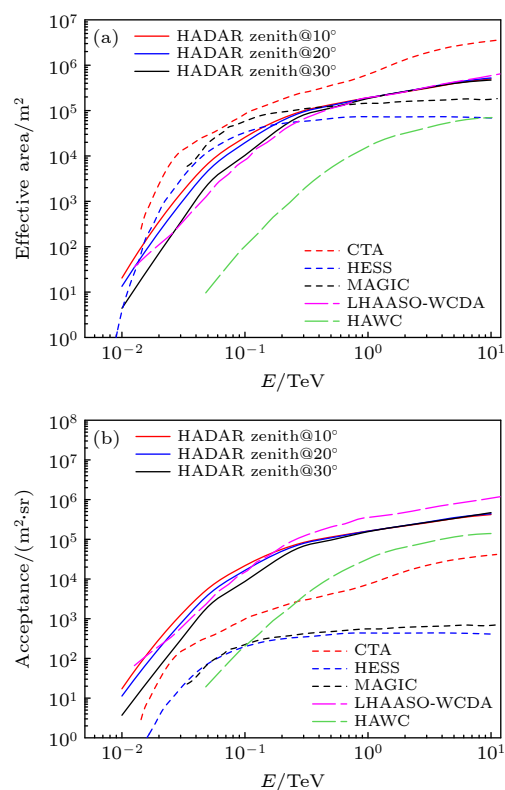


图 3 HADAR 实验的有效面积 (a) 不同天顶角伽马事例入射时的有效面积及与其他实验的比较; (b) 实验的有效孔径

Fig. 3. Performance of HADAR effective area: (a) Effective areas for incident γ -ray events at different zenith angles and comparison with other IACT and EAS experiments; (b) acceptance for HADAR and other experiments.

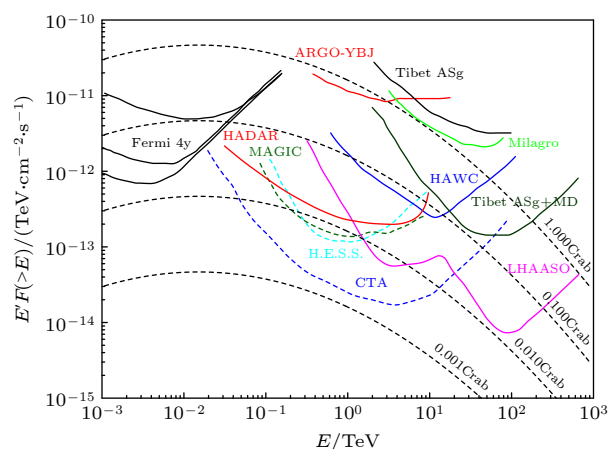


图 4 HADAR 及其他伽马射线实验的灵敏度曲线对比图
Fig. 4. Comparisons of the sensitivity of HADAR with other γ -ray instruments.

作为透镜主体进行实验,目前两个半球形透镜已加工完成,相关电子学及数据获取系统正在积极准备中,计划于2023年初进行安装并运行.第三步计划是用四个直径5 m的半球透镜组成探测阵列——HADAR,最终实现对高能伽马射线辐射的探测.

3 HADAR 对 AGN 观测的预期

本节给出 HADAR 运行一年时间能够探测到的 AGN 源的粗略估计.由于 AGN 变化非常剧烈,其流强和能谱在活跃期和平静期相差非常大,因此要得到一个准确的预测结果是非常困难的.我们基于现有实验对 AGN 伽马射线能谱的观测结果,给出 HADAR 观测的大概估计.

在 Fermi-LAT 实验公布的 4 LAC 源表中,在高银纬度 ($|b| > 10^\circ$) 范围内有 2863 个源被认定为 AGN 类型,其中包括 1067 个 BL Lacs, 655 个 FSRQs, 1077 个未知类型的耀变体以及 64 个其他类型的 AGN^[42].这些源中大部分是 GeV 能段的源,TeV 能段的源很少,通过与 TeVCat 源表比较,仅有 78 个 VHE 的源同时被地面切伦科夫望远镜实验观测到. IACTs 实验探测到的 TeV 源的数量较少,其中一个原因是现有的 TeV 地面实验不能以更高灵敏度对全天区进行连续扫描观测,另一个原因是由于 EBL 的吸收效应,高能光子很难被探测到. HADAR 实验覆盖能量范围较宽,为了研究 HADAR 对 TeV 能段的观测,利用 Fermi-LAT 观测到的源的能谱数据,将能量段延伸到 TeV 能段,同时加入 EBL 吸收效应,与 HADAR 的灵敏度进行比较,从而得到直观的 HADAR 对 AGN 的观测预期.

3.1 EBL 对高能光子的吸收

EBL 是分布在宇宙星系间的弥散性辐射, VHE 的伽马射线从源处产生到传播到地球的过程中会与 EBL 光子相互作用产生正负电子对 $\gamma_{\text{VHE}} + \gamma_{\text{EBL}} \rightarrow e^+ + e^-$, 相关的 EBL 模型可以参考文献 [43–50], 观测到的伽马射线流强可以用公式表示为

$$F_{\text{obs}}(E) = F_{\text{int}}(E) \times e^{-\tau(E,z)}, \quad (1)$$

其中 $F_{\text{int}}(E)$ 是本征谱, $F_{\text{obs}}(E)$ 是观测到的谱, $\tau(E,z)$ 是 EBL 的光深. 由于这种相互作用, 对于红移为 z 的伽马射线源, EBL 对能量为 E 的本征谱

会产生指数因子 $e^{-\tau(E,z)}$ 的衰减, 是光子能量和红移的函数. 这导致了在较低红移处, 衰减较小, 宇宙更加透明, 仅有高能光子受到影响被吸收 (几个 TeV). 然而在高红移处 (> 0.3), 宇宙变得不透明, 低能的光子也会被吸收 (几百个 GeV). 红移大于 1, 100 GeV 的光子已经被严重吸收.

3.2 伽马射线源的能谱

一般来说, 对于一个红移为 z 的源, 观测到的光子的能谱可以表示为

$$\frac{dN(E)}{dE} = N_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-(\alpha + \beta \log(E/E_0))} e^{-\tau(E,z)} e^{-E/E_{\text{c.o.}}}, \quad (2)$$

其中, N_0 是能量为 E_0 时的归一化流强, 单位是 $\text{TeV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, α 是能谱指数 (对大部分伽马射线源来说, $\alpha \geq 1.5$), β 是曲率参数 (β 为 0 时对应单一幂率谱), E_0 是参考能量, $E_{\text{c.o.}}$ 是截断能量, $\tau(E,z)$ 是能量为 E 时的光深.

3.3 AGN 能谱预期方法及结果

本节将 Fermi 观测的能谱能量外推至 VHE 能段. 选取 4 LAC 源表中在 HADAR 视场内且有红移记录的源作为研究样本, 共有 664 个满足条件的源, 其中有 375 个 BL Lacs 和 289 个 FSRQs. 它们的能谱指数分布与红移分布如图 5 所示, 其中黑色实线代表总样本, 蓝色虚线代表 BL Lacs, 红色虚线代表 FSRQs. 从能谱指数分布可以看出, BL Lacs 的能谱指数总体比 FSRQs 的能谱指数硬, 而其红移总体比 FSRQs 低. 相比于 FSRQ, BL Lacs (或者 HBL) 同步辐射峰的位置在更高能处, 且红移偏小, EBL 吸收效应弱, 导致高能的光子数更多, 这也许可以解释为什么 IACTs 探测到的耀变体大多为 BL Lacs, 而 FSRQs 只有在耀发态时才被探测到.

Fermi 对这些源采用了不同的能谱函数来拟合, 其中 519 个源用简单的幂率函数 (power law) 拟合, 即 (2) 式中的曲率参数 β 为 0, 145 个源用 log 函数 (Log parabola) 拟合, 即 (2) 式中曲率参数 β 不为 0. 其中大部分 BL Lacs 采用简单的幂率函数拟合. 这两个拟合函数都没有考虑能量截断项, 即 $e^{-E/E_{\text{c.o.}}}$ 近似为 1. 对这些源我们分别采用其原拟合函数加入 EBL 吸收效应进行外推, 来得到观测谱. 采用 5 种不同的 EBL 模型来计算

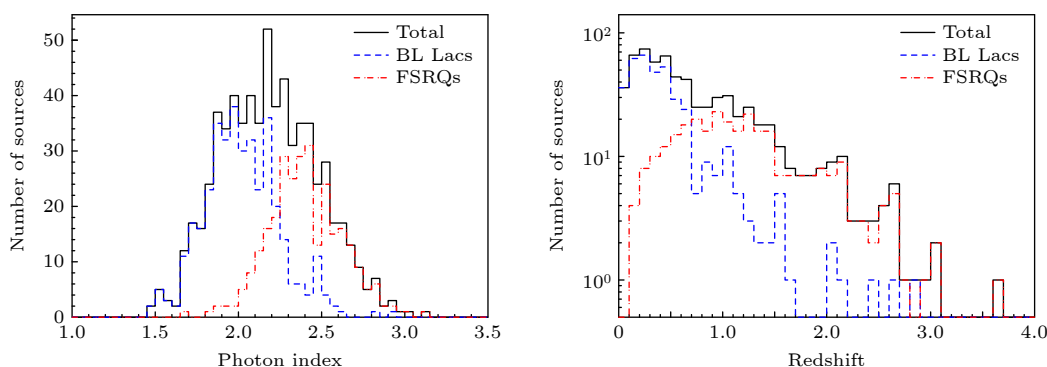


图 5 筛选出的 664 个 AGN 源的能谱指数分布图 (左) 与红移分布图 (右)

Fig. 5. Distribution of photon index (left) and redshift (right) for 664 selected AGN sources.

吸收效应, 分别是 Finke 10 模型^[45]、Dominguez 11 模型^[46]、Gilmore 12 模型^[47]、Inoue 13 模型^[49]及 Stecker16 模型^[50]. 外推的能谱为伽马射线一年的积分能谱, 以与 HADAR 的灵敏度曲线进行比较, 结果如图 6 所示. 图中蓝色实线为 BL Lacs, 红色虚线为 FSRQs, 黑色实线为 HADAR 的灵敏度曲线. 从图 6 可以看出, 总体来看在 TeV 能段 BL Lacs 的能谱流强要高于 FSRQs, 在能段两者都快速衰减, 通过与 HADAR 灵敏度曲线对比可以看出有部分 BL Lacs 和极少数 FSRQs 可以被 HADAR 探测到. 图 6 中采用的是 HADAR 运行一年的灵敏度曲线, 不同 EBL 模型下大约有 30 个 Fermi 观测到的 AGN 源能够被 HADAR 探测到.

采用这种 GeV 能谱函数外推的方法有一定的局限性, 首先很多源高能段的能谱结构还不清楚, 很多本征谱在能段可能存在拐折, 这容易导致结果的高估; 其次 Fermi 观测到的能谱是长期平均的观测结果, 没有体现出 AGN 源在耀发态时期的特点, 这容易导致结果的低估. 需要注意的是, 还有一部分源的样本没有考虑进来. 首先, 这里选用的源都是具有红移观测记录的, 在 HADAR 视场内还有 179 个 BL Lacs 没有红移测量记录; 其次, 未知类型的耀变体没有考虑进来; 最后, 在 Fermi 的 4FGL 源表^[51]中还有 1336 个未关联的源, 这些未关联的源在统计上来说也有一部分属于 BL Lac 类型. 将这些样本考虑进来, 可能会有更多的 AGN 源被 HADAR 探测到.

同时需要注意到该估计方法还可能存在另一种局限性. 我们对源的可探测性判断是通过源的积分流强与实验的灵敏度进行比较, 而实验阵列的灵敏度是根据 Crab 源的能谱和轨迹获得的, 更严格

的做法应该是将每个源的能谱与其灵敏度曲线做对比. 这里主要是为了直观地查看源的能谱变化情况, 因此是一个粗略估计.

4 观测显著性预期

前面将预测到的源的能谱与 HADAR 灵敏度曲线做对比, 比较直观. 本节采用更加严格的做法来估计 HADAR 对这些源的观测显著性. 采用快速模拟的方法分别产生伽马和宇宙线事例, 采用基于等天顶角的全天区扫描分析方法^[52]进行显著性分析. 基于前面所选的 AGN 样本, 计算在 HADAR 视场内的每个源一年观测时间的统计显著性, 模拟能量范围是 30 GeV—10 TeV.

4.1 模拟方法

HADAR 可以开展一定视场内的巡天扫描, 实际运行时探测到的事例中绝大多数是宇宙线本底, 来自伽马射线源的信号很少, 所以显著性估计就是要正确估计宇宙线本底数目和每个源的伽马射线信号数目. 根据 HADAR 在地平坐标系下的天顶角范围和实验位置坐标, 将天球坐标系按赤纬 (0.102° — 60.102°) 和赤经 (0° — 360°) 分成 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的格子单元, 每个格子记为 (i, j) . 在某一观测时刻 t , 将 HADAR 在地平坐标系下的观测视场沿天顶角 θ 方向从 0° 到 30° 等分成宽度为 0.08° 的环带, 沿方位角 ϕ 方向从 0° 到 360° 等分成小格, 方位角单元格的宽度依赖于天顶角 θ , 取为 $\frac{0.08^\circ}{\sin \theta}$, 这样使各方位角窗口的立体角近似相等 $\Omega = 1.95 \times 10^{-6}$, 每个单元格的编号记作 (t, θ, ϕ) .

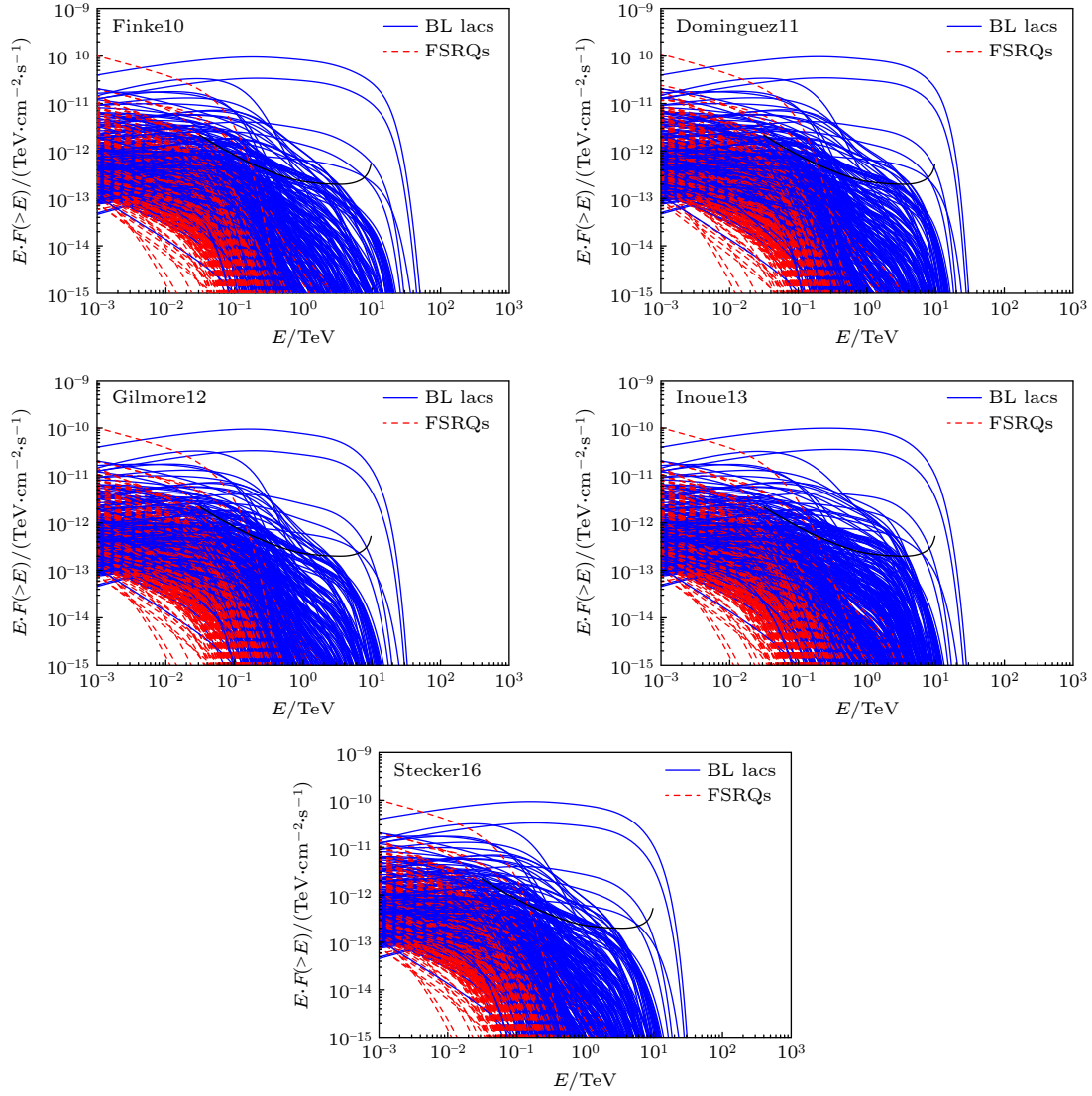


图 6 预期的经过 5 种不同 EBL 模型吸收之后的 AGN 源的伽马射线能谱图及与 HADAR 灵敏度曲线的比较. 其中蓝色实线为 BL Lacs, 红色虚线为 FSRQs, 黑色粗线为 HADAR 的灵敏度曲线

Fig. 6. Expected γ -ray spectra of the AGN sample after EBL absorption. Different panels are for the five different EBL models as labeled. The blue solid lines represent BL Lacs and red dashed lines represent FSRQs. The sensitivity of HADAR is shown with the thick black line.

利用处在同一天顶角但不同方位角上单元格的背景事例来估计宇宙线本底. 对于一个天顶角环带, 指向源的窗口称为“向源窗口 (on-source window)”, 环带上的其他窗口称为“背源窗口 (off-source windows)”, 则向源窗口的背景事例估计为所有背源窗口事例的平均值. 由于地球的自转运动, 源在地平坐标系单元格 (θ, ϕ) 上会形成一条轨迹. 则每一观测时间 t , 探测器所在的地平坐标系天区单元格 (t, θ, ϕ) 总是有相应的赤道坐标系单元格 (i, j) 的映射, 即 $(t, \theta, \phi) \rightarrow (i, j)$. 每个格子观测到的事例数为 $N(t, \theta, \phi)$, 则随着地球的自转, 赤道坐标系中单元格 (i, j) 内的事例数为 $N(i, j) =$

$\sum N_{\text{obs}}(t, \theta, \phi)$. 相对强度定义为 $I(i, j)$, 为向源区观测的事例数与本底事例数的比值, 即 $N_{\text{on}}(t, \theta, \phi)/N_{\text{off}}(t, \theta, \phi)$. 则向源区归一化的事例数为 $N_{\text{obs}}(t, \theta, \phi)/I(i, j)$. 同理, 背源区观测到的事例数为 $N_{\text{obs}}(t, \theta, \phi')$, 相对强度为 $I(i', j')$, 该背源区归一化的事例数为 $N_{\text{obs}}(t, \theta, \phi')/I(i', j')$, 则所有背源区平均的归一化事例数为 $\frac{1}{n_{\theta} - 1} \sum_{\phi'} \frac{N_{\text{obs}}(t, \theta, \phi')}{I(i', j')}$, 其中 n_{θ} 为当天顶角为 θ 时该环带窗口的数目.

对于观测时间的划分, 恒星时的日周期被分为 3600 份, 即时间间隔为 24 s. 对每个源观测时间的计算, 由于 HADAR 实验只能在晴朗无月夜观

测切伦科夫光, 所以计算时需要排除太阳光和月亮光等的影响. 模拟中选取太阳和月亮对地平坐标系的顶角大于 90° 时为无月夜. 由于太阳、月亮和地球的运动, 每个伽马射线源在每一天的有效观测时间不一致, 因此一年的有效观测时间为每天有效观测时间的累加.

根据源的位置、方向信息模拟得到观测事例数, 同时结合源区背景的估计, 可以计算出赤道坐标系中每个单元格位置处伽马射线超出的事例, 以此可以计算源的统计显著性. 对宇宙线背景事例数的计算可以用下式表示:

$$N_{\text{CR}}(t, \theta, \phi) = \eta_{\text{CR}} \int_E N_{\text{CR}}(E) A_{\text{CR}}(\theta, E) \Omega dE \delta t, \quad (3)$$

对伽马光子事例数的计算可以用下式表示:

$$N_\gamma(t, \theta, \phi) = \eta_\gamma \int_E N_\gamma(E) e^{-\tau(E, z)} A_\gamma(\theta, E) dE \delta t \varepsilon_\gamma(\Omega), \quad (4)$$

其中, $A_{\text{CR}}(\theta, E)$ 和 $A_\gamma(\theta, E)$ 分别是实验阵列对入射角度为 θ 、能量为 E 的原初宇宙线和伽马事例的微分有效面积, $N_{\text{CR}}(E)$ 是宇宙线能谱 [53], $N_\gamma(E)$ 是每个 AGN 源的能谱, Ω 是阵列角分辨所对应的立体角大小, $\varepsilon_\gamma(\Omega)$ 取 68% 是落在立体角 Ω 内的伽马事例占总伽马事例的百分比, η_{CR} 是模拟的通过伽马/质子鉴别后宇宙线的存活率, η_γ 是模拟的通过伽马/质子鉴别后伽马事例的存活率, δt 是观测时间 t 的采样时间间隔, 为 24 s. 其中, 伽马射线源的微分能谱采用 (2) 式的能谱公式, 具体的每个源的

能谱信息参考表 1. AGN 的流强会随着时间变化, 这里采用平均的能谱来做模拟, EBL 模型采用 Dominguez 11 模型为例进行研究.

从统计上来说, 向源区归一化的事例数与背景区平均的归一化的事例数相等. 根据最小二乘原理, 构造 χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{t, \theta, \phi} \left\{ \left[\frac{N_{\text{obs}}(t, \theta, \phi)}{I(i, j)} - \frac{1}{n_\theta - 1} \sum_{\phi'} \frac{N_{\text{obs}}(t, \theta, \phi')}{I(i', j')} \right] \times \sigma_{t, \theta, \phi}^{-1} \right\}^2, \quad (5)$$

通过最小化 χ^2 , 可以解得相对强度 $I(i, j)$ 和它的统计误差 $\Delta I(i, j)$, 则赤道坐标系某一天区 (i, j) 的背景事例可以表示为 $\frac{N(i, j)}{I(i, j)}$. 相对强度 $I(i, j)$ 代表了观测事例相对背景估计值的偏差, 因此显著性可以表示为

$$S = \frac{I(i, j) - 1}{\Delta I(i, j)}. \quad (6)$$

由于观测阵列有一定的角分辨, 部分来自源的信号会被重建到偏离源的方向, 为了最大化源的显著性, 一般用以该天区的中心为中心, 以角分辨 θ 为角半径范围的平均显著性来估计源的显著性.

4.2 预期结果

HADAR 实验对河外源 AGN 的观测显著性预期结果如表 1 所列, 表中列出了每个源的详细信

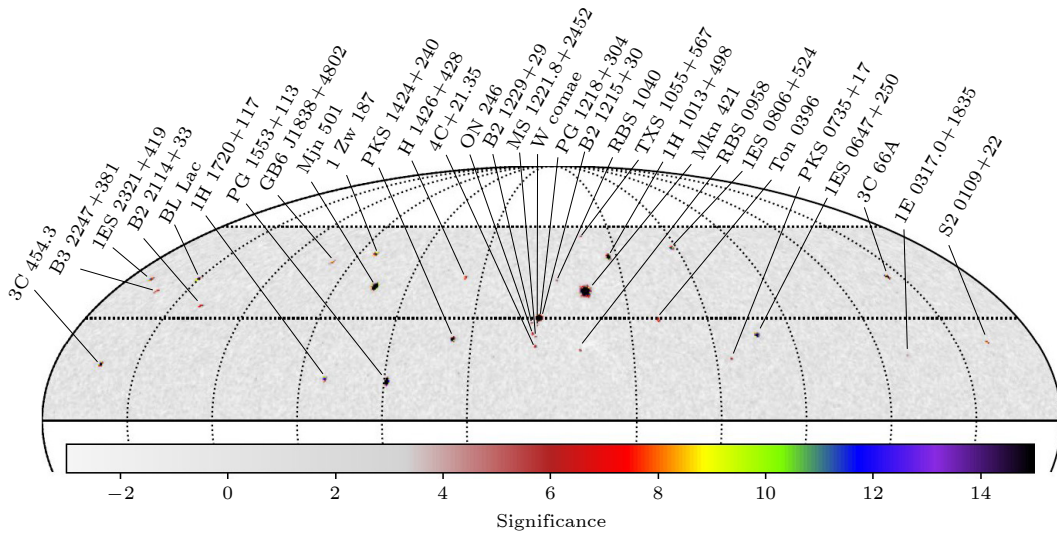


图 7 赤道坐标系 (J2000 坐标) 下 HADAR 对河外源的观测显著性预期, 显著性显示范围为 -3—15

Fig. 7. Expected significance of extragalactic sources in the equatorial coordinates (J2000 epoch) in the HADAR FOV. The visualization range is limited between -3 and 15.

表 1 HADAR 实验一年观测时间对河外源观测的显著性估计, 列表从左到右依次为: Fermi 源名称, 相关联的源, 赤经, 赤纬, 红移, 归一化的流强, E_0 , 谱指数 α , 谱指数 β , 一年内的有效观测时间, 预期显著性
Table 1. Expected significance of extragalactic sources with HADAR between 30 GeV and 10 TeV using a 1 yr observation time. Columns from left to right are as follows: Fermi source name, associations, R.A., Dec., redshift, normalization flux, E_0 , spectral index α , spectral index β , effective livetime, expected significance by HADAR.

Fermi Source	Assoc.	R.A./($^{\circ}$)	Dec./($^{\circ}$)	z	$N_0/(\text{TeV}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	E_0/GeV	α	β	Livetime/hrs	S/σ
4FGL J0112.1+2245	S2 0109+22	18.03	22.75	0.265	1.399×10^{-5}	0.76	1.99	0.057	277.8	8.9
4FGL J0222.6+4302	3C66A	35.67	43.04	0.444	1.008×10^{-5}	1.21	1.88	0.045	264.2	21.5
4FGL J0319.8+1845	1E 0317.0+1835	49.97	18.75	0.190	1.618×10^{-8}	5.98	1.67	0.0	257.8	5.1
4FGL J0650.7+2503	1ES 0647+250	102.70	25.05	0.203	6.587×10^{-7}	2.06	1.66	0.035	286.0	25.3
4FGL J0738.1+1742	PKS 0735+17	114.54	17.71	0.424	2.640×10^{-6}	1.54	1.97	0.065	251.3	7.4
4FGL J0809.8+5218	1ES 0806+524	122.46	52.31	0.138	2.222×10^{-6}	1.30	1.80	0.041	193.9	15.1
4FGL J0915.9+2933	Ton 0396	138.99	29.55	0.190	1.068×10^{-6}	1.35	1.74	0.083	294.7	7.8
4FGL J1015.0+4926	1H 1013+498	153.77	49.43	0.212	7.019×10^{-6}	1.01	1.76	0.041	220.0	29.9
4FGL J1058.6+5627	TXS 1055+567	164.67	56.46	0.143	2.525×10^{-6}	1.06	1.87	0.040	149.4	6.3
4FGL J1104.4+3812	Mkn 421	166.12	38.21	0.030	1.842×10^{-5}	1.29	1.72	0.023	284.9	529.6
4FGL J1117.0+2013	RBS 0958	169.27	20.23	0.139	4.167×10^{-7}	1.84	1.95	0.0	266.1	5.7
4FGL J1150.6+4154	RBS 1040	177.66	41.91	0.320	5.965×10^{-7}	1.73	1.65	0.091	270.0	6.6
4FGL J1217.9+3007	B2 1215+30	184.48	30.12	0.130	7.113×10^{-6}	1.07	1.88	0.040	295.1	31.6
4FGL J1221.3+3010	PG 1218+304	185.34	30.17	0.184	1.742×10^{-7}	4.44	1.71	0.0	295.2	31.3
4FGL J1221.5+2814	W Comae	185.38	28.24	0.102	3.516×10^{-6}	1.06	2.16	0.0	293.1	6.6
4FGL J1224.4+2436	MS 1221.8+2452	186.12	24.61	0.219	2.417×10^{-7}	2.36	1.89	0.0	284.6	5.5
4FGL J1224.9+2122	4C +21.35	186.23	21.38	0.434	2.187×10^{-4}	0.39	2.27	0.045	271.8	5.4
4FGL J1230.2+2517	ON 246	187.56	25.30	0.135	6.100×10^{-6}	0.82	1.99	0.061	286.7	6.0
4FGL J1231.7+2847	B2 1229+29	187.93	28.79	0.236	7.991×10^{-7}	1.58	1.99	0.0	293.9	5.1
4FGL J1427.0+2348	PKS 1424+240	216.76	23.80	0.604	6.508×10^{-6}	1.23	1.70	0.060	281.8	23.8
4FGL J1428.5+4240	H 1426+428	217.13	42.68	0.129	2.772×10^{-8}	5.02	1.66	0.0	266.1	9.7
4FGL J1555.7+1111	PG 1553+113	238.93	11.19	0.360	3.325×10^{-6}	1.85	1.54	0.070	199.5	58.9
4FGL J1653.8+3945	Mkn 501	253.47	39.76	0.033	4.439×10^{-6}	1.48	1.71	0.018	279.5	258.4
4FGL J1725.0+1152	1H 1720+117	261.27	11.87	0.180	7.214×10^{-7}	2.22	1.76	0.056	205.9	13.9
4FGL J1728.3+5013	I Zw 187	262.08	50.23	0.055	1.950×10^{-7}	3.01	1.78	0.0	213.2	24.1
4FGL J1838.8+4802	GB6J1838+4802	279.71	48.04	0.300	3.198×10^{-7}	2.55	1.85	0.0	231.3	6.1
4FGL J2116.2+3339	B2 2114+33	319.06	33.66	0.350	1.068×10^{-6}	1.71	1.74	0.102	294.4	7.2
4FGL J2202.7+4216	BL Lac	330.69	42.28	0.069	4.498×10^{-5}	0.75	2.18	0.060	268.2	15.0
4FGL J2250.0+3825	B3 2247+381	342.51	38.42	0.119	2.881×10^{-8}	5.33	1.72	0.060	284.2	9.9
4FGL J2253.9+1609	3C 454.3	343.50	16.15	0.859	6.408×10^{-4}	0.52	2.39	0.0	240.7	14.7
4FGL J2323.8+4210	1ES 2321+419	350.97	42.18	0.059	2.926×10^{-7}	2.47	1.90	0.0	268.7	13.4

息. 可以看出, HADAR 运行一年时间在其视场内可以观测到 31 个显著性大于 5 倍标准偏差的 AGN 源, 其中大部分为 BL Lacs 类型的源, FSRQs 类型的源只有两个, 分别为 4C + 21.35 和 3C 454.3. Mrk 421 的观测显著性为 529.6. 两维的显著性天图如图 7 所示, 显著性显示范围为 3—15.

5 结 论

二十几年来, 人们观测 VHE 伽马射线源的能力有了巨大提高. IACTs 实验有着较好的灵敏度和角分辨性能, 然而 IACTs 实验往往具有窄的视场, 因而不能持续地对多个源进行监测, 只能对单

一源进行观测,同时对一些瞬变源等爆发现象不能及时跟踪并监测. EAS 实验具有大视场和连续监测的优势,但往往只能对高能伽马射线进行观测. 因此,一种具有相对低阈能、大视场,且采用新透镜技术的地面阵列实验 HADAR 被提出并展开. 通过与目前实验的灵敏度曲线对比, HADAR 的灵敏度与 MAGIC 和 H.E.S.S. 的相当,但是在长时间监测和大视场测量中具有更好的能力. HADAR 采用大的折射式水透镜技术来实现对伽马射线的观测,可以对天区进行连续扫描和观测,在观测河外源方面具有明显优势.

本文讨论了 HADAR 实验对 AGN 的观测预期,基于 Fermi 的 4LAC 源表,将 4LAC 源 GeV 能段的能谱外推到 TeV 能段,同时考虑 EBL 的吸收效应. 通过与 HADAR 实验一年运行时间的灵敏度曲线进行对比,不同 EBL 模型下大约有 30 个源的流强高于 HADAR 的灵敏度. 考虑到还有一些没有红移测量记录的源,并且 4LAC 中存在未分类的 AGN 源和 Fermi 4FGL 源表中存在未关联的源,实际可探测到的 AGN 源的数量可能还要增加. 此外,外推产生的 Fermi 耀变体的 TeV 能谱,存在能谱的不确定性,也导致了观测不能精确预期. 最后,由于 AGN 的流强是显著变化的,耀发时期的流强和能谱与低态时期有显著差异,实际上也增加了估计 AGN 源数量的不确定性.

采用模拟每个源的伽马射线和宇宙线背景事例的方法,对 4LAC 中每个源的观测显著性进行了精确计算. 结果显示在 Dominguez 11 EBL 模型下,当 HADAR 运行一年时间,有 31 个 AGN 源以 5 倍显著性被探测到.

HADAR 具有大视场和连续监测的优势,可以对 AGN 的活动性进行长期监测,这是目前对 sub-TeV 瞬变源观测极具此优势的地面望远镜实验. 对此类 AGN 的长期观测和与其他 IACTs 实验的联合研究将有助于更好地探索喷流中粒子的加速机制,研究甚高能辐射区域的位置信息,限制 EBL,以及检验洛伦兹对称性破缺等,可以对 AGN 的物理机制进行更好的研究.

参考文献

- [1] Aharonian F, Akhperjanian A G, Bazer-Bachi A R 2007 *Astrophys. J.* **664** L71
- [2] Albert J, Aliu E, Anderhub H 2007 *Astrophys. J.* **669** 862
- [3] Sikora M, Begelman M C, Rees M J 1994 *Astrophys. J.* **421** 153
- [4] Marscher A P 2016 *Galaxies*. **4** 37
- [5] Aharonian F 2000 *New. Astron.* **5** 377
- [6] Mücke A, Protheroe R J, Engel R, Rachen J P, Stanev T 2003 *Astropart. Phys.* **18** 593
- [7] Fossati G, Maraschi L, Celotti A, Comastri A, Ghisellini G 1998 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **299** 433
- [8] Ghisellini G, Righi C, Costamante L, Tavecchio F 2017 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **469** 255
- [9] Padovani P, Giommi P 1995 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **277** 1477
- [10] Ajello M, Arimoto M, Axelsson M 2019 *Astrophys. J.* **878** 52
- [11] Hinton J A 2004 *New. Astron. Rev.* **48** 331
- [12] Aleksić J, Ansoldi S, Antonelli L A 2016 *Astropart. Phys.* **72** 61
- [13] Weekes T C, Badran H, Biller S D 2002 *Astropart. Phys.* **17** 221
- [14] Abeysekara A U, Alfaro R, Alvarez C 2013 *Astropart. Phys.* **50** 26
- [15] Sciascio G D 2016 *Nucl. Part. Phys. P.* **279** 166
- [16] CTA Consortium 2018 *Science with the Cherenkov Telescope Array* (Singapore: World Scientific) pp11–26
- [17] Punch M, Akerlof C W, Cawley M F 1992 *Nature* **358** 477
- [18] Quinn J, Akerlof C W, Biller S 1996 *Astrophys. J.* **456** L83
- [19] Albert J, Aliu E, Anderhub H 2008 *Science* **320** 1752
- [20] Aliu E, Archambault S, Arlen T 2012 *Astrophys. J.* **750** 94
- [21] Abramowski A, Acero F, Aharonian F 2012 *Astron. Astrophys.* **538** A103
- [22] Abramowski A, Acero F, Aharonian F 2013 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **434** 1889
- [23] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M 2011 *Astrophys. J.* **736** 131
- [24] Ahnen M L, Ansoldi S, Antonelli L A 2017 *Astron. Astrophys.* **603** A31
- [25] Abdalla H, Adam R, Aharonian F 2021 *Astron. Astrophys.* **648** A23
- [26] Arlen T, Aune T, Beilicke M 2012 *Astrophys. J.* **762** 92
- [27] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M 2011 *Astrophys. J.* **727** 129
- [28] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J 2012 *Astrophys. J.* **758** 2
- [29] Albert J, Aliu E, Anderhub H 2007 *Astrophys. J.* **667** 358
- [30] Gilmore R C, Madau P, Primack J R, Somerville R S, Haardt F 2009 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **399** 1694
- [31] Inoue S, Salvaterra R, Choudhury T R, Ferrara A, Ciardi B, Schneider R 2010 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **404** 1938
- [32] Takahashi K, Inoue S, Ichiki K, Nakamura T 2011 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **410** 2741
- [33] Wang Z, Guo Y Q, Cai H 2018 *Exp. Astron.* **45** 363
- [34] Xin G G, Yao Y H, Qian X L 2021 *Astrophys. J.* **923** 112
- [35] Holler M, Balzer A, Chalmé-Calvet R, de Naurois M, and Zaborov D 2015 *Proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference*, Hague, Netherlands, 30 July–6 August 2015 **34** 980
- [36] Aleksić J, Ansoldi S, Antonelli L A 2016 *Astropart. Phys.* **72** 76
- [37] Ma X H, Bi Y J, Cao Z 2022 *Chinese Phys. C* **46** 030001
- [38] DeYoung T 2012 *Nucl. Instrum. Meth. A* **692** 72
- [39] Zhao Y, Yuan Q, Bi X J, Zhu F R, Jia H Y 2016 *Int. J. Mod. Phys. D* **25** 1650006
- [40] Cai H, Zhang Y, Liu C 2017 *J. Instrum.* **12** 09023
- [41] Chen T L, Liu C, Gao Q 2019 *Nucl. Instrum. Meth. A* **927** 46
- [42] Ajello M, Angioni R, Axelsson M 2020 *Astrophys. J.* **892** 105

- [43] Stecker F W, De Jager O C, Salamon M H 1992 *Astrophys. J.* **390** L49
- [44] Franceschini A, Rodighiero G, Vaccari M 2008 *Astron. Astrophys.* **487** 837
- [45] Finke J D, Razzaque S, Dermer C D 2010 *Astrophys. J.* **712** 238
- [46] Domínguez A, Primack J R, Rosario D J 2011 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **410** 2556
- [47] Gilmore R C, Somerville R S, Primack J R, Domínguez A 2012 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **422** 3189
- [48] Helgason K, Kashlinsky A 2012 *Astrophys. J. Lett.* **758** L13
- [49] Inoue Y, Inoue S, Kobayashi M A R, Makiya R, Niino Y, Totani T 2013 *Astrophys. J.* **768** 197
- [50] Stecker F W, Scully S T, Malkan M A 2016 *Astrophys. J.* **827** 6
- [51] Abdollahi S, Acero F, Ackermann M 2020 *Astrophys. J. Suppl. S.* **247** 33
- [52] Amenomori M, Ayabe S, Chen D 2005 *Astrophys. J.* **633** 1005
- [53] Gaisser T K, Stanev T, Tilav S 2013 *Front. Phys.* **8** 748

COVER ARTICLE

Prospective study on observations of gamma-ray emission from active galactic nuclei using the HADAR experiment*

Qian Xiang-Li¹⁾²⁾ Sun Hui-Ying¹⁾ Chen Tian-Lu^{2)†} Danzengluobu²⁾
 Feng You-Liang²⁾ Gao Qi²⁾ Gou Quan-Bu³⁾ Guo Yi-Qing^{3)4)‡}
 Hu Hong-Bo³⁾⁴⁾ Kang Ming-Ming⁵⁾ Li Hai-Jin²⁾ Liu Cheng³⁾
 Liu Mao-Yuan²⁾ Liu Wei³⁾ Qiao Bing-Qiang³⁾ Wang Xu¹⁾ Wang Zhen⁶⁾
 Xin Guang-Guang⁷⁾ Yao Yu-Hua⁸⁾³⁾ Yuan Qiang⁹⁾ Zhang Yi⁹⁾

1) (School of Intelligent Engineering, Shandong Management University, Jinan 250357, China)

2) (Key Laboratory of Cosmic Rays, Ministry of Education, Tibet University, Lhasa 850000, China)

3) (Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

4) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

5) (College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

6) (Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

7) (Suzhou Aerospace Information Research Institute, Suzhou 215000, China)

8) (College of Physics, Chongqing University, Chongqing 401331, China)

9) (Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China)

(Received 16 October 2022; revised manuscript received 9 November 2022)

Abstract

The High Altitude Detection of Astronomical Radiation (HADAR) experiment is a refracting terrestrial telescope array based on the atmospheric Cherenkov imaging technique. It is a hybrid array consisting of four water-lens telescopes and a surrounding scintillation detector array for observing Cherenkov light induced by

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12263005, 11873005, 11705103, 12005120, 12147218, U1831208, U1632104, 11875264, U2031110) and the Key Laboratory for Cosmic Ray of the Education Ministry of China, Tibet University (Grant No. KLCR-202201).

† Corresponding author. E-mail: chentl@ihep.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: guoyq@ihep.ac.cn

10 GeV–10 TeV cosmic rays and gamma rays in the atmosphere. The water-lens telescope mainly consists of a hemispherical lens with a diameter of 5 m acting as a Cherenkov light collector, a cylindrical metal tank with a 4 m radius and 7 m height, and an imaging system at the bottom of the tank. The sky region covered by HADAR is much larger than the current generation of Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes, and even the CTA. The field-of-view (FOV) of HADAR can reach up to 60 degrees. The HADAR experiment possesses the advantages of a large field-of-view and low energy threshold, so it can continuously scan wide portions of the sky and easily observe extragalactic gamma-ray sources. The majority of the extragalactic gamma-ray sources detected at very high energy (VHE) energies are active galactic nuclei (AGNs). In this study, we present the potential of using the HADAR experiment for detecting AGN. Based on the AGN catalog sources of the Fermi Large Area Telescope (Fermi-LAT), the observed energy is extrapolated to the VHE range. The VHE gamma rays propagating over cosmological distances can interact with the low-energy of the extragalactic background light (EBL) and produce electron-positron pairs. Therefore, we consider the absorption effects of different EBL models when calculating the expected gamma ray spectra of the AGN sample. We select the sample with redshift measurements and locations inside the FOV of HADAR from 4LAC catalog. In total, there are 375 BL Lacertae objects (BL Lacs) and 289 flat-spectrum radio quasars (FSRQs) satisfying the selection conditions. The integral gamma ray spectra are derived and compared with the sensitivity curve of HADAR, the number of sources with fluxes above the sensitivity of HADAR is counted. Further, we calculate the statistical significance of HADAR for AGN source observation based on the equi-zenith angle sky scanning analysis method. The simulation results reveal that a total of 31 sources of Fermi-LAT AGN can be detected by HADAR with a significance greater than five standard deviations over a one-year survey period, most of which are BL Lacs.

Keywords: HADAR, atmospheric Cherenkov telescope, active galactic nuclei, significance

PACS: 95.55.Ka, 95.55.Cs, 29.40.Ka, 98.70.Rz

DOI: [10.7498/aps.72.20221976](https://doi.org/10.7498/aps.72.20221976)

HADAR实验对活动星系核伽马射线辐射观测的预期研究

钱祥利 孙惠英 陈天禄 单增罗布 冯有亮 高启 苟全补 郭义庆 胡红波 康明铭 厉海金 刘成 刘茂元 刘伟
乔冰强 王旭 王振 辛广广 姚玉华 袁强 张毅

Prospective study on observations of gamma-ray emission from active galactic nuclei using the HADAR experiment

Qian Xiang-Li Sun Hui-Ying Chen Tian-Lu Danzengluobu Feng You-Liang Gao Qi Gou Quan-Bu
Guo Yi-Qing Hu Hong-Bo Kang Ming-Ming Li Hai-Jin Liu Cheng Liu Mao-Yuan Liu Wei Qiao
Bing-Qiang Wang Xu Wang Zhen Xin Guang-Guang Yao Yu-Hua Yuan Qiang Zhang Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 049501 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221976

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221976>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

X射线聚焦望远镜光学设计

Optical design of X-ray focusing telescope

物理学报. 2019, 68(16): 160702 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190709>

三种降采样成像策略的性能优化以及与传统傅里叶望远镜的比较

Performance optimization of three down-sampling imaging strategies and their comparison with the conventional Fourier telescope

物理学报. 2019, 68(7): 074203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181801>

膝区宇宙线广延大气簇射次级成分的特征

Properties of secondary components in extensive air shower of cosmic rays in knee energy region

物理学报. 2022, 71(24): 249601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221556>

激发态丰质子核的双质子发射

Two-proton emission from excited states of proton-rich nuclei

物理学报. 2022, 71(6): 062301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211839>