

在羊八井测量初级宇宙线直达质子研究质子和空气核非弹性作用截面*

兰小刚^{1,1)} 侯艳¹ 周勋秀¹ 贾焕玉¹ 曹臻² 丁林恺²

1(西南交通大学现代物理研究所 成都 610031)

2(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 提出了一种在高海拔通过测量直达质子来确定质子和空气核(p-air)的非弹性作用截面的方法,并通过 Monte Carlo 模拟,研究了其可行性. 假定将一台类似于 KASCADE 的强子量能器设置在西藏羊八井 ARGO 探测器的中央,选择大气簇射(AS)轴心落在强子量能器内的事例,用全覆盖 ARGO 阵列作 AS 的反符合,用强子量能器测量非伴随的高能强子,即能以已知的效率得到一个直达质子事例样本. 利用这个样本,本工作以 1%—2% 的精确度还原了 Monte Carlo 模拟中所使用的 p-air 非弹性作用截面,从而证明了这一方法的可行性.

关键词 强子量能器 ARGO 大气簇射 反符合 p-air 非弹性作用截面

1 引言

目前在空间运载工具上进行的对初级宇宙线成分和能谱的直接测量只能达到 10^{14} eV, 短期内难于达到 10^{15} eV 能区. 膝区宇宙线成分的研究都依赖在地面上对大气簇射(AS)的测量, 即所谓间接测量. 分析间接测量的数据并导出物理结果, 必须依靠 Monte Carlo 模拟. 事实表明, 不论采用何种分析方法, 膝区宇宙线成分的结论都对 Monte Carlo 模拟中使用的强子作用模型有依赖. 至今不同实验对膝区宇宙线成分所作出的结论存在明显分歧^[1]. 针对膝区宇宙线成分研究中存在的问题, 近年来提出了进一步检验和改进强子作用模型的要求^[2].

Monte Carlo 对宇宙线大气簇射传播过程的描写和模拟, 主要受强子作用模型中朝前区粒子的产生及质子-空气核(p-air)非弹性作用截面的影响. 因而, 检验强子作用模型应主要从这两方面着手. 关于朝前区粒子产生问题将另文讨论. 本文提出一种通过在羊八井测量宇宙线直达质子, 以确定 p-air 非弹性作用截面的方法. 这一方法的要点是: 以非伴随 AS 粒子和非伴

随高能强子作为实验上选择直达质子的条件; 针对一种实验探测的方案, 用 Monte Carlo 模拟求出直达质子的选择效率; 由直达质子流和在大气层外通过直接测量获得的初级质子流的比值, 来决定 p-air 非弹性作用截面.

2 工作能区和实验方案的选择

本工作选择对 p-air 非弹性作用截面(σ_{p-air}^{in})检验的能区为 1 TeV 到 20 TeV. 这包含以下几方面的原因.

首先, 目前已有的几家在 TeV 到 10 TeV 能区测量 σ_{p-air}^{in} 的实验, 大多是在海平面(或近海平面)采用接收度不大的量能器或磁谱仪测量宇宙线单根非伴随强子的产额, 藉以推导 σ_{p-air}^{in} ^[3]. 由于在探测器内的非伴随强子不一定没有伴随 AS 粒子, 也不一定在探测器外没有伴随其他强子, 加之上述实验使用的量能器不能区分 π , K 介子与质子, 也不能区分中性强子, 所以, 在推导 σ_{p-air}^{in} 时需要进行多项修正, 所得结果的可靠性明显依赖于修正计算中使用的作用模型. 图 1 画出了几家实验测量 σ_{p-air}^{in} 的结果^[3], 彼此存在一定差

2006 - 09 - 11 收稿

* 国家自然科学基金(10120130794)资助

1) E-mail: lanxiaogang007@126.com

异. 图中还列出了 CORSIKA^[4]所包含的几种模型中使用的理论 $\sigma_{p\text{-air}}^{\text{in}}$ 曲线. 可以看出, 在 TeV 到 10TeV 能区, CORSIKA 所使用的 $\sigma_{p\text{-air}}^{\text{in}}$ 也在调整, 2000 年的理论曲线已明显上调, 并系统地高于实验点 10% 左右^[5]. 因此, 采用更为可靠的实验方法更为精确地测量这个能区的 $\sigma_{p\text{-air}}^{\text{in}}$ 仍是必要的.

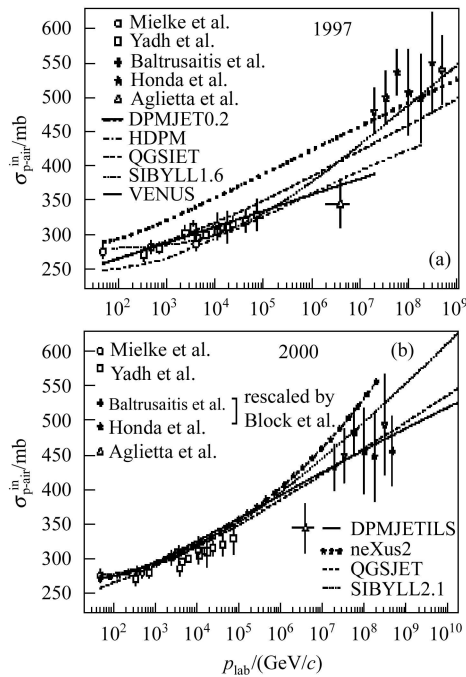


图 1 部分 p-air 作用非弹性截面测量值^[3], 以及在 CORSIKA 不同模型中所使用的理论值^[4, 5]

其次, 近几年在 TeV 能区通过在大气层外进行的直接测量, 已经获得了比过去更为精确的初级宇宙线质子谱^[6], 只要在地面上测得直达质子谱, 就可以比过去更为精确地推导 $\sigma_{p\text{-air}}^{\text{in}}$. 问题在于: 如何测得地面直达质子谱? 实验上, 这有几个要求: 1) 观测面的海拔要高, 以便记录尽可能多的直达质子; 2) 探测手段要能够判断并选择直达的质子; 3) 探测器要能测量直达质子的能量.

羊八井 ARGO 地毯式 AS 探测器已基本建成, 它是迄今可以最大限度地记录 AS 粒子的一个 AS 探测器. 本工作选择的实验方案是: 在 ARGON 阵列中央设置一台类似 KASCADE 所使用的强子量能器 (事实上, 一些国内外的宇宙线研究者近来正在讨论将退役后的 KASCADE 强子量能器移到羊八井的优越性及可能性), 用 ARGON 作为 AS 的反符合探测器, 选择未产生 AS 的直达质子, 以强子量能器测量到达其中的单根强子的能量. 由以下讨论可以看到, 对于 1TeV 到 20TeV 能区 $\sigma_{p\text{-air}}^{\text{in}}$ 的测量, 这一实验方案能满足以上各个条件.

3 直达质子样本大小的估计

根据上一节拟定的实验方案, 首先根据 CORSIKA-QGSJET 里所使用的 $\sigma_{p\text{-air}}^{\text{in}}$ ^[4], 估计直达质子的样本大小. 取 ATIC 在空间对初级宇宙线质子谱的直接测量结果^[6]:

$$I_p(> 1\text{TeV}) \approx 4.5 \times 10^{-6} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}, \quad (1)$$

设初级宇宙线质子由 0° 到 60° 的天顶角范围入射, 击中海拔 4300m 处 320m^2 的强子量能器. 计算中, 将 1—20TeV 按对数等间隔分为 10 个小区间. 由第一次作用点的大气深度服从指数分布, 可以算出在一年有效运行时间内, 在每个能量区间, 到达羊八井上述接收范围的直达质子数及直达质子概率.

计算结果表明: 如果 CORSIKA-QGSJET 里所使用的 $\sigma_{p\text{-air}}^{\text{in}}$ 正确, 则在 TeV 能区, 一年内达到上述探测器接收范围的直达质子的事例样本很大, 直到 20TeV 仍比较大. 在这个能区进行 $\sigma_{p\text{-air}}^{\text{in}}$ 测量, 不存在统计量不足的问题.

同时, KASCADE 强子量能器直到 1PeV 测量强子能量的误差低于 15%^[7]. 在 1—20TeV 应有更高的精度. 所以本工作主要讨论 1—20TeV 的 $\sigma_{p\text{-air}}^{\text{in}}$.

4 直达质子事例的选择标准和选择效率

为了从实验上将直达质子事例样本选出来, 需要决定事例选择标准并得出相应的选择效率. 我们的作法是: 采用 CORSIKA-QGSJET 的 $\sigma_{p\text{-air}}^{\text{in}}$, 作大量 AS 事例的 Monte Carlo 模拟, 将模拟事例的轴心投射到强子量能器中, 记录强子量能器和 ARGON 阵列对 AS 粒子的响应. 然后设定实验上选择直达质子事例的条件, 选出直达质子的事例样本. 选择条件是否设置得合适, 则由选出的直达质子事例样本可否推导出 QGSJET 的 $\sigma_{p\text{-air}}^{\text{in}}$ 来作判断.

取 ATIC 的实验初级质子谱, 初级质子在 1—200TeV 以能谱指数 -2.7 , 天顶角 0° 到 60° 范围内入射. 采用 CORSIKA-QGSJET 模型模拟 AS 的产生和发展, 跟踪粒子直到 4300m 的羊八井高度. 采用全 Monte Carlo 模拟, 强子、 μ 子成分跟踪到 0.3GeV, 电子、光子成分跟踪到 5MeV. 假设 KASCADE 强子量能器被放置在 ARGON 阵列正中央, 将模拟事例的入射轴以均匀分布投射到 $20\text{m} \times 16\text{m}$ 的强子量能器内. 量能器以 $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ 为一个测量单元, 每个单元对强子测量的阈能为 50GeV ^[7]. 假定 $111\text{m} \times 99\text{m}$ 范围内

(除去强子量能器 320m^2) 完全为 ARGO 探测器覆盖, 测量 AS 粒子数的单元是面积为 $1.25\text{m} \times 1.4\text{m}$ 的一个电子学模拟量读出单元, 称为一个大 pad, 每个大 pad 记录粒子数的范围设置在 1 到 1000. 对每个事例, 可以记录以下观测量:

N_h 强子量能器中记录到强子能量在 50GeV 以上的单元数;

ΣE_h N_h 个单元记录的强子总能量;

$E_h^{\text{top}}, x_t, y_t$ 强子量能器各单元中记录到的最高能量以及这个单元的坐标;

N_{pad} ARGO 阵列中有带电粒子击中的大 pad 的数目;

ΣN_e . 这些大 pad 记录的带电粒子数总和, 等.

直达质子事例应该是尚未产生 AS 的事例, 首先应满足 $N_{\text{pad}} = 0$ (或等价地, $\Sigma N_e = 0$). 分析按此标准选出的事例后发现, $N_{\text{pad}} = 0$ 的事例中, 还有一部分在量能器中有伴随强子, 所以还应要求 $N_h = 1$. 为了对高空产生了簇射而簇射尾部只剩一个强子的事例加以一定的限制, 还应要求 $E_h^{\text{top}} > 999\text{GeV}$. 这是因为我们研究 1TeV 以上的 $\sigma_{\text{p-air}}^{\text{in}}$, 而 1TeV 的直达质子在大气中只有少量电离能量损失. 按照这 3 个条件, 在入射到上述接收范围的 2.15×10^8 个 (相当于 2.4 年的实验运行) $1\text{--}200\text{TeV}$ 的质子中选出了 322768 个“直达质子”.

检查这个“直达质子”样本的第一次作用高度 z_1 , 发现真正直达 (即 $z_1 \leq 4300\text{m}$) 的事例只占样本事例数的 68.2%, 即在 $N_{\text{pad}} = 0$, $N_h = 1$, $E_h^{\text{top}} > 999\text{GeV}$ 的条件下, 仍然选进了 31.8% 的假性直达事例. 这可能有以下原因:

1) 部分首次作用产生在极低空的事例, 它们的簇射粒子未击中 ARGO 阵列, 只出现在量能器内, 同时它们的伴随强子出现在量能器的同一单元内;

2) 少量首次作用点较高的事例, 它们到达羊八井已是簇射尾部, 簇射粒子数量很少并出现在 ARGO 阵列外;

3) 少量首次作用点很高的事例, 它们的簇射粒子已被吸收, 而在强子量能器中可能有伴随强子, 但能量均低于 50GeV .

这一部分假性直达事例很难 (或不可能) 用事例选择条件加以排除, 只有通过在大气层中和探测器内对 AS 的详细模拟, 求出假性直达事例比例, 按比例加以扣除.

5 结果

作出假性直达质子的初能分布, 看出与整个“直达质子”样本的初能分布没有明显的差别. 将选出的“直达质子”样本按第 3 节的作法分为 10 个能量区间, 按 68.2% 的比例扣除假性直达事例, 得到“真直达质子样本”, 由此推导 $\sigma_{\text{p-air}}^{\text{in}}$.

质子与空气核非弹性作用的平均自由程 $\lambda_{\text{p-air}}^{\text{in}}$ 与非弹性作用截面 $\sigma_{\text{p-air}}^{\text{in}}$ 间有以下关系

$$\lambda_{\text{p-air}}^{\text{in}} = A_{\text{air}} / N_A \sigma_{\text{p-air}}^{\text{in}}, \quad (2)$$

(2) 式中 A_{air} 是空气核的平均质量数, N_A 是 Avogadro 常数. 质子到达大气深度 $X(\theta)$ 处, 未与空气原子核发生作用的概率为

$$p_{\text{p-air}}^{\text{in}} = e^{-X(\theta)/\lambda_{\text{p-air}}^{\text{in}}}, \quad (3)$$

对每个能量区间, (3) 式左边由直达质子数与入射质子数的比例求得. 在每个能量区间, 包含了不同天顶角入射的直达质子, 算出它们到达观测面所穿过的平均大气深度 $X(\theta)$, 即可按下式推导 $\sigma_{\text{p-air}}^{\text{in}}$:

$$\sigma_{\text{p-air}}^{\text{in}} = -A_{\text{air}} \cdot \ln(p_{\text{p-air}}^{\text{in}}) / X(\theta) \cdot N_A, \quad (4)$$

由 (4) 式得到 $1\text{--}20\text{TeV}$ 能区的 $\sigma_{\text{p-air}}^{\text{in}}$, 见图 2. 图中所示误差为运行 2.4 年所得数据的统计误差. 对能量最高的一个区间, 统计误差仍小于 1%. 图 2 还画出了 QGSJET 的截面值. 如前所述, 本方法应能重现 QGSJET 的截面值. 与后者比较, 本工作得出的截面值高了 $3\text{--}5\text{mb}$, 即相差约 $1\%\text{--}2\%$. 这可能由于假性直达质子的扣除率 31.8% 略高了一点. 这个值的误差依赖于 Monte Carlo 样本的大小. 进行更大样本的 Monte Carlo 模拟, 将可得到更准确的假性直达质子事例扣除率.

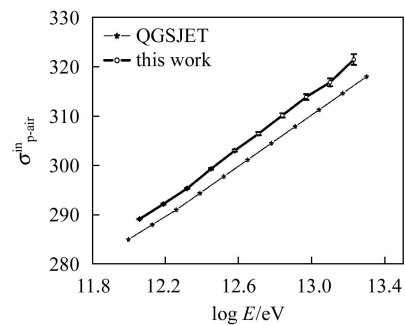


图 2 测得 p-air 非弹性作用截面与 QGSJET 使用的截面值比较

6 结论和讨论

以上分析说明, 在4300m高度, 利用全覆盖的ARGO阵列作AS的反符合, 利用KASCADE强子量能器测量直达质子, 积累2—3年的运行数据, 可以以小于1%的统计误差重新测得1—20TeV的p-air非弹性作用截面. 与已有的测量这个截面的其他实验方法^[3]相比, 这一方法采用AS反符合辨别直达质子, 具有更高的准确性及可靠性. 其结果可用于对当前AS模拟计算中正在使用的截面进行校验.

目前, 利用这一方法所得截面比应得结果系统偏高1%—2%, 应主要来自对假性直达质子的扣除率偏高. 更大样本和更详细的探测器模拟, 应能消除这一偏差.

利用这一方法求出的截面, 其中可能包含其他来源的系统误差还有: ATIC质子谱的误差, 量能器测量能量的误差以及直达质子入射天顶角测量的误差. 取ATIC实测质子谱^[6]强度的不确定性为10%—20%, 重复上一节的推导过程, 所得 $\sigma_{\text{p-air}}^{\text{in}}$ 与图2相差1%—2.5%, 已知直到1PeV, 量能器能量测量的误差低于15%^[7], 1—20TeV应为KASCADE量能器能量测量精度很好的能区, 取这个能区能量测量的误差为10%, 并按高斯分布对能量取样, 重新推导 $\sigma_{\text{p-air}}^{\text{in}}$, 所得结果与图2相差小于0.1%; 本工作利用量能器确定1—20TeV能区单根直达质子的入射天顶角, 假定存在1°, 3°或

5°的测量误差, 并服从高斯分布, 导出的 $\sigma_{\text{p-air}}^{\text{in}}$ 在3种假设下与图2相差均小于0.1%.

这一方法采用ARGO阵列作AS的反符合. 反符合的效率是由Monte Carlo得到的, 它是否依赖作用模型? 首先, AS反符合率(或AS产生率)依赖于非弹性截面, 而这正是我们作为未知量要测量的, 可不考虑这一部分的模型依赖. 问题在于, 产生了AS的事例确实被ARGO阵列判断为AS事例, 这一点是否依赖作用模型? 由于ARGO阵列在AS近轴区具有大面积的全覆盖特点, 预期这一依赖即使存在也可以忽略.

本工作讨论p-air非弹性作用截面的测量只达到20TeV. 事实上, KASCADE强子量能器可以测更高能量的强子^[7]. 只要增加运行时间, 可以测到50TeV或更高能量.

本工作的着重点, 是在ARGO建成的条件下, 论述一种测量p-air非弹性作用截面的途径, 并验证其可行性. 在本阶段, 未进行准确的探测器模拟, 由于ARGO探测器存在噪音, 部分 $N_{\text{pad}}=0$ 的事例可能被记录为 $N_{\text{pad}} \neq 0$; 同时由于探测器的探测效率不可能达到100%, 也可能使部分 $N_{\text{pad}} \neq 0$ 的事例被记录为 $N_{\text{pad}}=0$. 因此进行实际测量时, 针对具体的探测器设置, 更准确地计入探测器的布局、性能和效率, 计入事例重建的效率和误差, 更准确地确定假性直达质子事例率, 是十分必要的.

感谢何会海对本工作提出的许多宝贵建议和有益讨论.

参考文献(References)

- 1 Glasmacher M et al. *Astropart. Phys.*, 1999, **12**: 1; Weber J et al. *Proc. 26th ICRC*. 1999, **1**: 341; Engel J et al. *Proc. 26th ICRC*. 1999, **1**: 349; Swordy S, Kieda D. *Astropart. Phys.*, 2000, **13**: 137; Arqueros F et al. *Astron. Astrophys.*, 2000, **359**: 682; Fowler J W et al. *Astropart. Phys.*, 2001, **15**: 49; Ulrich H et al. *Proc. 27th ICRC*. 2001, **1**: 97; Antoni T et al. *Astropart. Phys.*, 2002, **16**: 245
- 2 Haungs A et al. *Nucl. Phys.*, 2006, **B151**(Proc. Suppl.): 167; Engel R et al. *Nucl. Phys.*, 2006, **B151**(Proc. Suppl.): 437
- 3 Brooke G, Wolfendale. *Proc. Phys. Soc.*, 1964, **83**: 843; Yodh G B et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1972, **28**: 1005; Diggory I S et al. *J. Phys.*, 1974, **A7**: 741; Ashton F, Saleh A J. *Nature*, 1975, **256**: 387; Baruch J E F et al. *J. Phys.*, 1979, **G5**: 595; Siohan F et al. *J. Phys.*, 1977, **G3**: 1157; Yodh G B et al. *Phys. Rev.*, 1983, **27**: 1183; Mielke H H et al. *J. Phys.*, 1994, **G20**: 637
- 4 Heck D et al. *Report FZKA*, 1998, 6019
- 5 Heck D et al. *Proc. 30th ISMD*. 2001, 252; Block M M et al. *Phys. Rev.*, 2000, **D62**: 077501
- 6 Ahn H C et al. *Proc. 28th ICRC*. 2003, 1853
- 7 Engler J et al. *Nucl. Instrum. Methods*, 1999, **A427**: 528; Antoni T et al. *Nucl. Instrum. Methods*, 2003, **A513**: 490

Study of p-Air Inelastic Cross Section with Directly Arrived Protons at Yangbajing^{*}

LAN Xiao-Gang^{1;1)} HOU Yan¹ ZHOU Xun-Xiu¹ JIA Huan-Yu¹ CAO Zhen² DING Lin-Kai²

1 (Institute of Modern Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

2 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract A method of determining the p-air inelastic cross section by measuring the directly arrived protons at high altitudes is presented. Its feasibility is studied via a Monte Carlo simulation. Assuming a KASCADE-like hadron calorimeter is set up at the center of the Yangbajing ARGO array, selecting events with air shower (AS) cores hitting the calorimeter, using the full-coverage ARGO array as AS anti-coincidence and using the calorimeter to measure energies of the unaccompanied hadrons, the directly arrived primary protons can be registered with a known efficiency. By the obtained event sample of directly arrived protons the p-air inelastic cross section used in the Monte Carlo can be re-produced with a precision of 1%—2% that demonstrates the feasibility of this approach.

Key words hadron calorimeter, ARGO, air shower, anti-coincidence, p-air inelastic cross section

Received 11 September 2006

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10120130794)

1) E-mail: lanxiaogang007@126.com