实验为科学知识奠定基础

通过测量宇宙射线通量证明“新物理”

A.Chilingarian，G.Hovsepyan

埃里温物理研究所

摘要

一百多年来．人们一直在地球表面测量辐射．最初使用的是最简单的静电计．如今则使

在寻找“新物理”的过程中．除了多年收集数据的努力．通常还会叠加复杂的多变量“图形”

本文旨在说明．对不同种类宇宙射线通量的测量如何能够得出有意义的物理推断。我们

1. 物理学中的证明

物理学是一门归纳性学科，它接受一些假设，收集经验结果，将其与其他实验和理论进行比较，

标准词典对“证明”的定义：

- 促使人们接受某项断言为真的证据。
- 用于证实事实或陈述真实性的论证。

- 确立陈述有效性的过程，尤其是根据推理原则从其他陈述推导得出。

因此，根据定义，物理学及其他实验学科中的科学证明以经验证据为基础，最终旨在使学

为清晰说明这一程序，我们先将当前问题形式化：我们要寻找地球大气层或太空中的某种

我们必须仔细研究计数率的所有影响因素，进行必要的修正，并估计探测器对不同粒子

粒子探测器

有许多粒子探测器用于记录不同种类的宇宙射线。我们的目标不是对这些探测器进行综述、开展比较分析，也不是讨论粒子与测量介质之间的相互作用。我们希望解释如何正确使用所获取的数据进行物理推断，即证明我们测量到的是真实的新物理过程信号。物理推断的示例将基于在阿拉加茨宇宙射线（CR）观测站进行的测量 [1]；我们将仅提供有关探测器运行的最低限度信息，并引用可从埃里温物理研究所（YerPhI）宇宙射线部门（CRD）数据库轻松下载的图形和数值格式数据[2]。

图1展示了阿拉加茨运行的部分粒子探测器。SEVAN网络的主要传感器（图1a，参见Chilingarian等人，2018）由标准规格的50 x 50 x 5cm^3 塑料闪烁体板组成。在两组相同的100 x 100 x 5 cm3闪烁体（每组由四块标准板组成）之间，安装了两块100 x 100 x 5 cm^3 铅吸收体，以及一组厚度为50 x 50 x 25 cm^3 的闪烁体组（由5块标准板组成）。探测器的顶部、底部和中间层均装有集光锥和光电倍增管（PMT）。带电粒子能够被上层5厘米厚的闪烁体有效探测；然而，要探测中性粒子，则需要更多的物质。当中性粒子穿过上方较薄的（5cm）

闪烁体时，通常不会产生信号。入射的中性粒子会在厚达25厘米的塑料闪烁体中发生核反应，并产生带电粒子。上层闪烁体没有信号，而中层闪烁体有信号，这表明有中性粒子（伽马射线或中子）穿过。数据采集（DAQ）电子设备负责记录并存储探测器信号的所有逻辑组合，以供后续离线分析并发布在线警报。如果用“1”表示闪烁体产生信号，用“0”表示没有信号，那么三层探测器可能产生以下输出组合：“111”和“101”——高能缪子穿过；“010”——中性粒子穿过；“100”——低能带电粒子穿过并停留在闪烁体或第一块铅吸收体中（能量小于≈100 兆电子伏特）。“110”——能量较高的带电粒子穿过，并停留在第二块铅吸收体中。“001”——探测到倾斜入射带电粒子。数据采集（DAQ）电子设备可远程控制光电倍增管的高压以及其他探测器参数。SEVAN探测器的总重量（包括钢架和探测器外壳）为≈1,5吨。亚美尼亚、东欧国家和德国共有10台SEVAN探测器在运行。

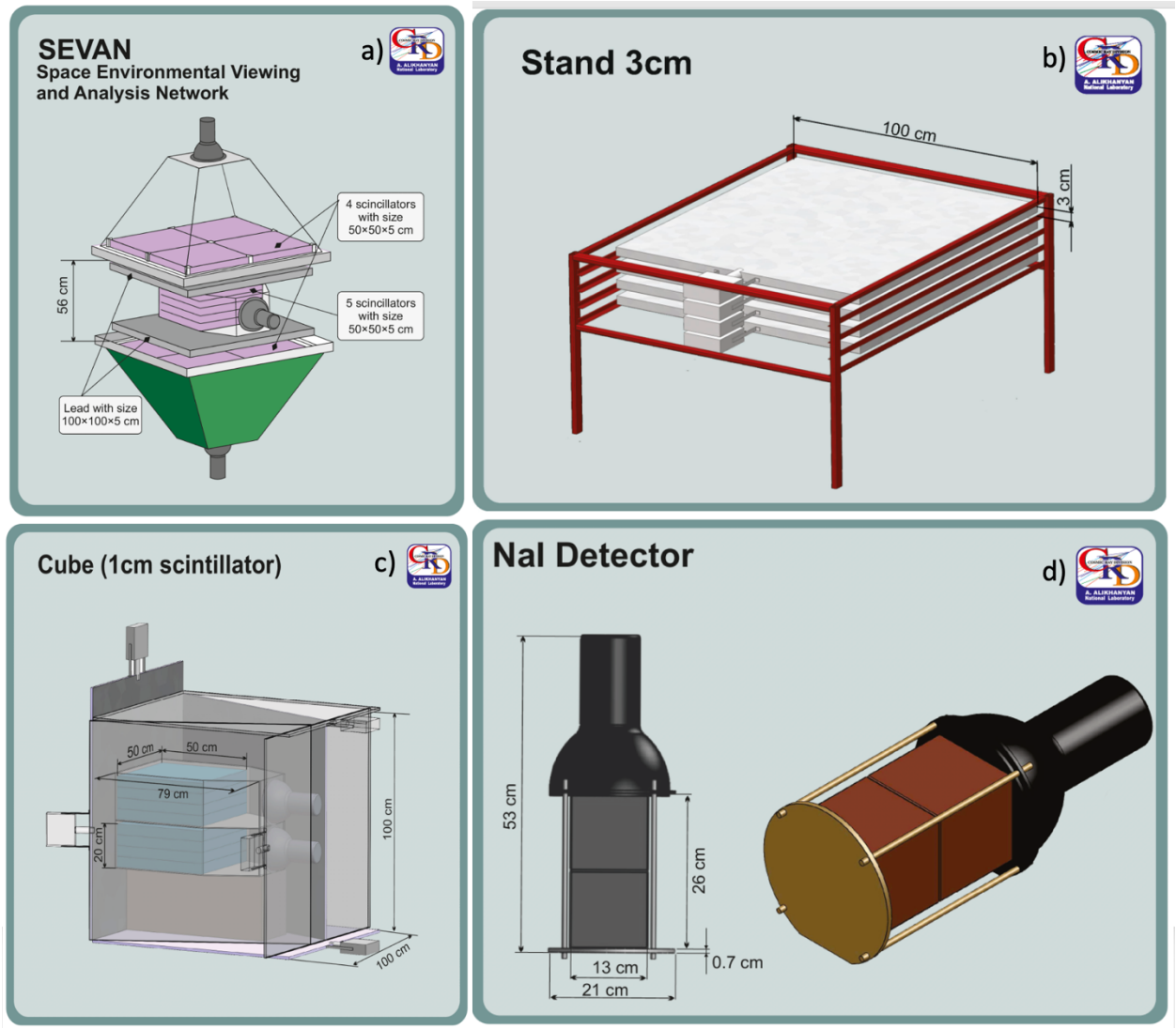

图 1. 在阿拉加茨运行的粒子探测器

“STAND3”探测器由四层垂直堆叠的闪烁体组成，每层厚1厘米，灵敏面积为1米^2，见图1b。这些闪烁体由俄罗斯联邦谢尔普霍夫的高能物理研究所制造。闪烁体发出的光经光谱移位光纤传输后，重新辐射至长波长区域，并传送至光电倍增管（FEU-115M光电倍增管）。发光峰值波长为420纳米，发光时间约为2.3纳秒。通过改变施加到光电倍增管上的高压，并设置成形鉴别器的阈值，可调节STAND3探测器。鉴别电平的选择旨在确保信号探测效率高，同时最大限度地抑制光电倍增管噪声。四层信号的符合事件可用于筛选能量阈值为10兆电子伏特（“1000”符合事件，仅上层有信号）至60兆电子伏特（“1111”符合事件，所有层均有信号）的带电粒子。

立方体组件（图 1c）由两个厚 20 cm、面积为 0.25-m^2 的闪烁体组成，外侧包裹着厚 1 cm、面积为 1-m^2 的闪烁体。这种设计可确保任何带电粒子若要击中内部区域，必定会先击中周围的“反符合”闪烁体。厚 20 cm 的塑料闪烁体由配备大面积光阴极、在低噪声模式下工作的光电倍增管 PM-49 进行观测。周围的探测器（共六个）是厚 1 cm 的模制塑料闪烁体。厚 1 cm 的闪烁体对中性粒子的记录效率为 1–2%，且受粒子能量影响较小。电子和 μ子穿过厚 20 cm 的塑料闪烁体时的能量损失为 ~40 兆电子伏特。考虑到探测器的构造材料（2 mm 厚的铁板和 1 cm 厚的塑料闪烁体）以及建筑物屋顶（1 mm 厚的铁板），上方厚 20 cm 闪烁体的电子探测能量阈值估计约为 10 兆电子伏特，下方闪烁体则为 ~40 兆电子伏特。厚 20 cm 的闪烁体对伽马射线的记录效率为 ~20%，中子探测效率为 ~27%。

用于测量粒子能量的 NaI 探测器网络由 4 台 Na((Tl) 能谱仪（图 1d）组成，封装在密封的 3 毫米厚铝外壳中。每块晶体的各个侧面都涂覆了 0.5 厘米厚的氧化镁（MgO）（因为晶体具有吸湿性），并设有一个透明窗口，朝向 FEU-49 光电倍增管的光阴极。光电倍增管的大尺寸阴极（直径 15 厘米）可实现出色的集光效果。FEU-49 的光谱灵敏度范围为 300–850 纳米，覆盖了 NaI(Tl) 发出的光的光谱。每块 NaI 晶体的灵敏面积为 ~0.0348 m^2, ，四块晶体的总面积为 ~0.14 m^2, ，伽马射线探测效率为 60–80%。使用对数模数转换器（LADC）对光电倍增管信号进行编码。通过探测铯-137同位素发出的 662 keV 伽马射线峰，以及 NaI 晶体能量沉积直方图中的 μ子峰（出现在 ≈ 50 兆电子伏特），完成了 LADC 校准及编码—能量转换校准。调整光电倍增管的高压，使 LADC 输出信号直方图同时覆盖这两个峰，从而确保 LADC 在 0.3–50 兆电子伏特能区内具有线性。NaI 晶体灵敏体积上方有大量物质（0.7 毫米的屋顶倾斜层、3 毫米的铝和 5 毫米的 MgO），阻止能量低于 ~3 兆电子伏特的电子进入探测器的灵敏体积。因此，3 兆电子伏特以下的 NaI 能谱仪网络只能探测伽马射线。

2. **探测器响应函数、探测器的纯度和效率，以及探测器对带电和中性宇宙射线粒子的响应**。

任何探测器的计数率都取决于其尺寸、地理位置和记录效率。计数率会受到大气压、室外温度梯度的影响

、近地表电场（NSEF）、地磁场和太阳风的影响。计数率还取决于供电线路和变压器中的振荡、昼夜和年度周期性，以及粒子探测所利用的物理过程随机性所产生的噪声等。

为了推导出具有物理意义的参数，我们必须对测得的计数率进行反卷积，使其不依赖于探测器的具体特性；估计粒子进入探测器之前的不同粒子通量和能谱，并确定宇宙射线通量及其误差。没有这些工作，任何实验测量量的呈现都毫无意义。

首先，我们必须研究粒子探测器对不同粒子通量的响应。这就是所谓的宇宙射线正问题：对于给定的粒子通量，确定（测量或模拟）计数率。最好的方法是利用人造加速器上的粒子束进行校准。然而，这并不是一种容易获得的选择。因此，我们使用宇宙射线通量生成器（例如 EXPACS [3], ，可给出所有纬度、经度和高度处的所有宇宙射线粒子种类的通量）以及 GEANT4代码 [4] （高能物理实验的标准工具）进行探测器响应建模。这样一来，额外的“模型”误差会影响实验测量值，并损害由此进行的物理推断（参见 [5] 中基于模拟进行物理推断的方法）。尽管如此，我们无法避免这一点；没有模拟，测得的通量就是任意的，物理推断也毫无意义。

在表 1 中，我们展示了利用 EXPACS 和 GEANT4 软件包得到的 STAND3 探测器（图 1b）符合事件的所谓纯度。从表中可以看出，“1000”符合事件能有效筛选出中子（17.2 %）和伽马射线（33.6%），“1111”符合事件筛选出 μ子（77%），而“100”符合事件筛选出低能 μ子和电子（80%）。因此，STAND3 探测器可以研究三种次级宇宙射线。

表 1. 用于测量阿拉加茨（海拔 3200 米）次级宇宙射线通量环境本底的 STAND3 符合事件纯度（百分比）

第二。	纯度（%）			
type	1000	1100	1110	1111
n	17.22	5.83	2.20	0.48
p	4.37	7.42	7.28	6.23
mu+	5.01	12.21	23.03	41.28
mu-	4.52	11.08	20.04	35.92
e-	21.31	24.77	19.95	6.85
e+	13.44	18.62	15.67	6.67
伽马射线	33.57	20.07	11.83	2.57

仅靠纯度计算不足以表征探测器。我们还需要知道记录效率，它通常是粒子能量的函数。因此，在表2中，我们展示了STAND3探测器其他符合事件的记录效率随能量的变化（图 1b）。从表中可以看出，探测器层的符合事件很大程度上取决于电子能量。“1000”符合事件（信号经过上层闪烁体后衰减）有效筛选出

能量为10–20兆电子伏特的电子；“1100”符合事件对应能量为20–30兆电子伏特的电子；“1110”对应能量为30–40兆电子伏特的电子；“1111”则对应能量高于50兆电子伏特的电子。

表2. STAND3探测器电子探测效率（%）。

STAND3 闪烁体 1	闪烁体 2	闪烁体 3	闪烁体 4	1000	1100	1110	1111	总和
10兆电子伏特	81.27	0.19	0.16	0.14	81.23	0.01	0.00	0.00	81.25
12兆电子伏特	89.58	0.31	0.27	0.22	89.34	0.10	0.00	0.00	89.43
14兆电子伏特	92.09	0.50	0.39	0.34	91.45	0.29	0.00	0.00	91.73
16兆电子伏特	93.12	5.72	0.52	0.45	87.28	5.22	0.00	0.00	92.50
18兆电子伏特	93.66	23.98	0.71	0.62	69.97	22.72	0.00	0.00	92.69
20兆电子伏特	94.07	44.31	0.96	0.80	50.43	42.23	0.03	0.00	92.70
30兆电子伏特	94.78	82.54	23.79	2.13	13.08	57.41	20.73	0.03	91.26
40兆电子伏特	95.00	89.10	63.09	14.53	6.22	25.89	47.18	10.29	89.58
50兆电子伏特	95.06	91.28	77.17	44.70	4.10	14.10	33.13	37.47	88.79
60兆电子伏特	95.21	92.38	82.99	61.91	3.08	9.41	22.86	53.19	88.54

表3展示了STAND3探测器对伽马射线的探测效率。从表中可以看出，尽管探测器层对高能（>20 兆电子伏特）伽马射线的探测效率达到20%或更高，但符合事件的效率要低得多。因此，为了分离混合电子-伽马通量，最好使用STAND3符合事件来比较模拟和实测计数率。

表3 STAND3探测器对伽马射线的探测效率（%）。

STAND3 闪烁体 1	闪烁体 2	闪烁体 3	闪烁体 4	1000	1100	1110	1111	总和
10兆电子伏特	5.88	6.03	5.48	4.94	5.81	0.03	0.00	0.00	5.84
20兆电子伏特	7.07	10.77	10.13	9.15	4.55	2.35	0.02	0.00	6.92
30兆电子伏特	7.43	13.99	14.67	13.42	2.06	4.22	0.89	0.01	7.18
40兆电子伏特	7.63	15.50	18.64	18.02	0.83	3.56	2.52	0.37	7.28
50兆电子伏特	7.90	16.29	21.25	21.89	0.44	2.37	3.16	1.50	7.47
60兆电子伏特	8.09	16.77	22.92	25.04	0.29	1.43	3.10	2.83	7.65

3. 大气参数对粒子探测器计数率的影响

80年来，阿拉加茨站持续测量不同种类的次级宇宙射线和超高能初级宇宙射线。使用碘化钠和塑料闪烁体测量电子、μ子和伽马射线，使用中子监测器和混合型SEVAN探测器测量中子，并使用中子监测器测量广延大气簇射核心。使用NaI能谱仪和闪烁能谱仪还原能谱。

Davis Vantage Pro2气象站包括雨量收集器、温度传感器、湿度传感器、风速计、太阳辐射传感器、紫外线辐射传感器等。

通过由六台场磨仪（Boltek EFM-100）组成的网络测量近地表静电场的变化，其中三台部署在阿拉加茨站，一台部署在距离阿拉加茨12.8公里的诺尔安贝尔德站，一台部署在距离阿拉加茨15公里的布拉坎，另一台部署在距离阿拉加茨39公里的埃里温。地磁场的3个分量由LEMI- 018矢量

磁力计测量。所有数据均输入CRD/YerPhI的高级数据提取基础设施（ADEI），从而为多变量可视化和相关性分析提供了丰富的可能性。图2展示了影响粒子探测器计数率的大气参数。其中最重要的是室外温度（红色）、大气压（洋红色）和NSEF（黑色）。大气效应造成的计数率偏差可达10%，超过了预期的天体物理源产生的所有细微效应。因此，应进行专门修正，以便将可能的“新物理”与大气因素造成的简单偏差区分开来。

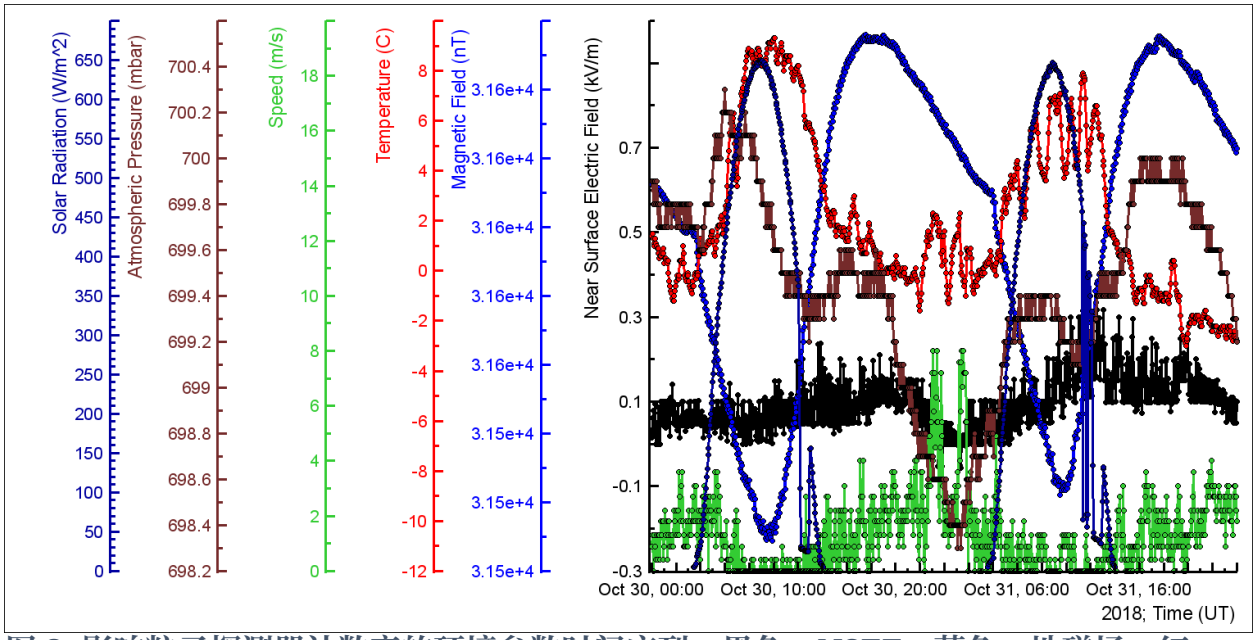

图 2. 影响粒子探测器计数率的环境参数时间序列。黑色—NSEF；蓝色—地磁场；红色—室外温度；绿色—风速；洋红色—大气压。

图3展示了上述参数对NaI探测器计数率的影响（蓝色曲线）。

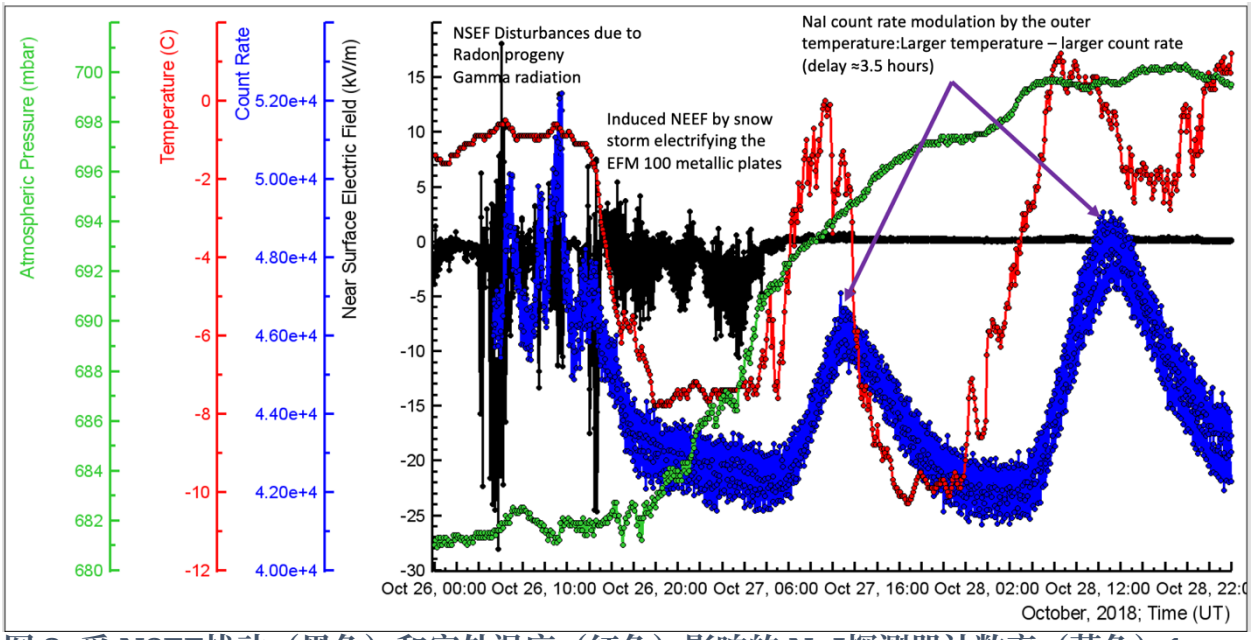

图 3. 受 NSEF扰动（黑色）和室外温度（红色）影响的 NaI探测器计数率（蓝色）1分钟时间序列。温度对计数率的影响极其显著，而大气压（绿色）的剧烈变化所产生的影响并未显现。

图4展示了时间序列相关性分析的一个示例。NaI晶体位于阿拉加茨SKL实验大厅的金属屋顶下方。在晴天（红色表示太阳辐照），屋顶会将热量传递给探测器（但存在3.5小时的延迟，见图中及插图里的绿色竖线），从而显著提高计数率（黑色曲线，增幅为12%）。

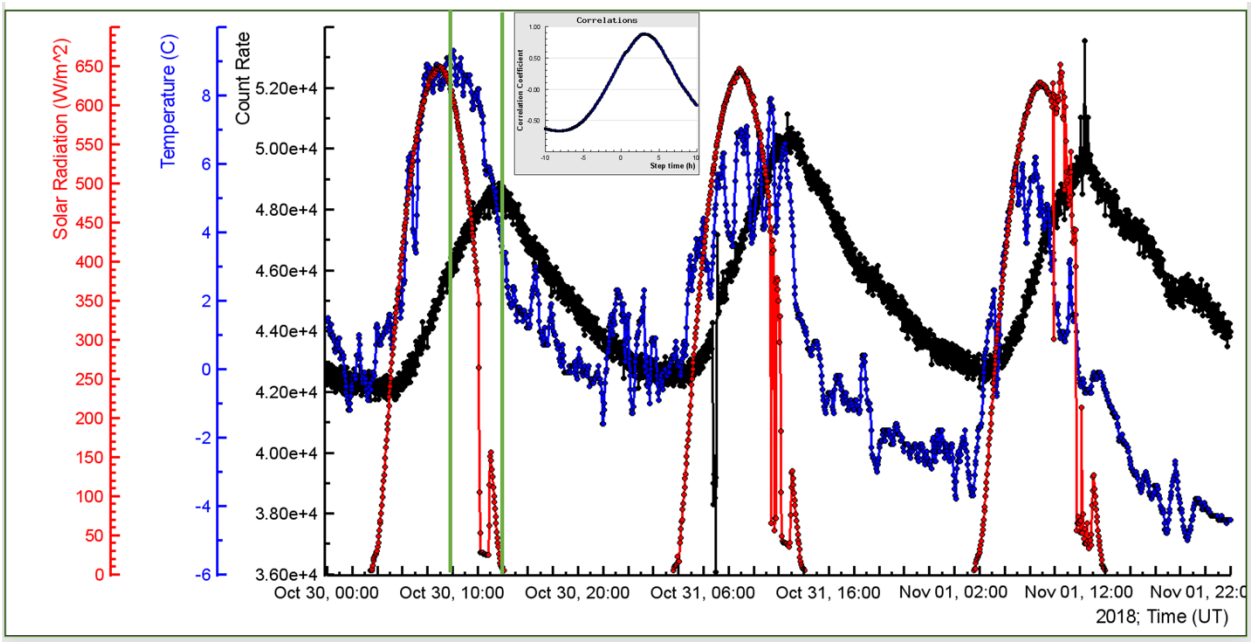

图4. NaI探测器的1分钟计数率（黑色曲线）受室外温度变化（蓝色曲线）的影响。红色曲线表示太阳辐照。插图显示了延迟相关曲线。

闪烁探测器的计数率与温度呈负相关，且受大气压的影响最大。计数率变化有几个众所周知的原因，在基于CR测量进行物理推断之前，都应仔细考察这些原因。

4. 测得计数率的统计矩、相对误差以及检测到的峰的显著性。随机误差的高斯性质。

研究探测器参数时，应选择一段天气条件相对稳定、不会显著影响探测器计数率的时期。计数率由统计矩描述；这些参数的抽样估计值为均值和方差。在测量具有固有涨落的计数率后，我们必须判断测得的变化（增强或减弱）是否在可接受范围内，还是异常爆发，表明出现了新物理（或探测器故障）。我们将以最近在阿拉加茨观测到的雷暴地面增强（TGE，[6]）为例，展示如何找出真实峰值的技术。

2022年夏季，阿拉加茨天气干燥而炎热。极少数“夏季雷暴地面增强”期间的粒子通量增强从未超过8%，相应的峰值显著性（以高于晴好天气值的标准差数表示）也从未超过10。突然，在9月22日的一场普通风暴期间，探测器记录到7次雷暴地面增强，其中3次的粒子通量增强非常大，见图5，其中描绘了STAND3探测器的四次符合事件。对于

对增强的通量进行数字化并比较后，我们计算了所有气象参数均保持稳定时晴朗天气下的均值和方差（见图6）。

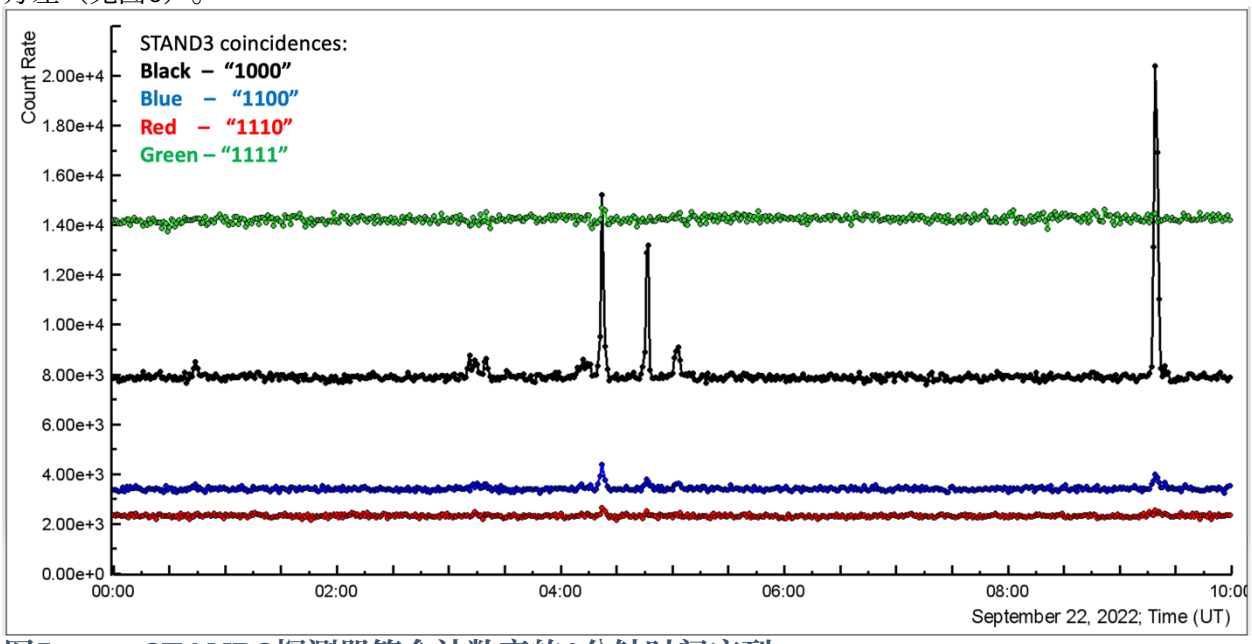

图5。　　STAND3探测器符合计数率的1分钟时间序列　　s

图6所示的分布及其均值、方差和相对误差，可用于衡量对"新物理"的灵敏度；相对误差给出了信号值的下限，低于该下限的信号可视为可能的伪影。符合事件的相对误差略有不同；不过，3%可作为保守估计值。所有幅度在3%以内的涨落，均不能视为显著偏离均值，也不应进一步作为可能的非平凡信号加以考察。在图7中，我们展示了7次TGE事件中的一次的计数率时间序列，其中可以看到所有STAND3探测器符合事件中均出现峰值。每个峰值的标准差数（临界值，Nσ）根据图6中的数据计算得出。根据内曼–皮尔逊统计决策方法[7],，临界值是固定的，用来接受或拒绝所谓的H_0 假设，即所有事件（包括巨型爆发）都属于高斯总体（受控过程），例如。每个临界值（医学研究中通常设为3，基本粒子搜索中通常设为5，例如参见[8],[9]中的图8）都对应一个所谓的p值，即高斯函数从临界值到无穷大的积分。要证明"新物理"信号的存在，我们必须以尽可能高的置信度拒绝H_0 。然而，显著偏离H_0,（即H_0 为真的概率极低）并不意味着相反的假设自动成立。正如Astone和D'Agostini所指出的[10],，标准假设检验的逻辑背后隐藏着经典反证法的一个修订版本："在标准辩证法中，人们先假定一个假设为真，然后寻找明显为假的逻辑后果，以此否定该假设。统计检验中引入的'细微'差别在于，用'极不可能的后果'取代了虚假的后果。"

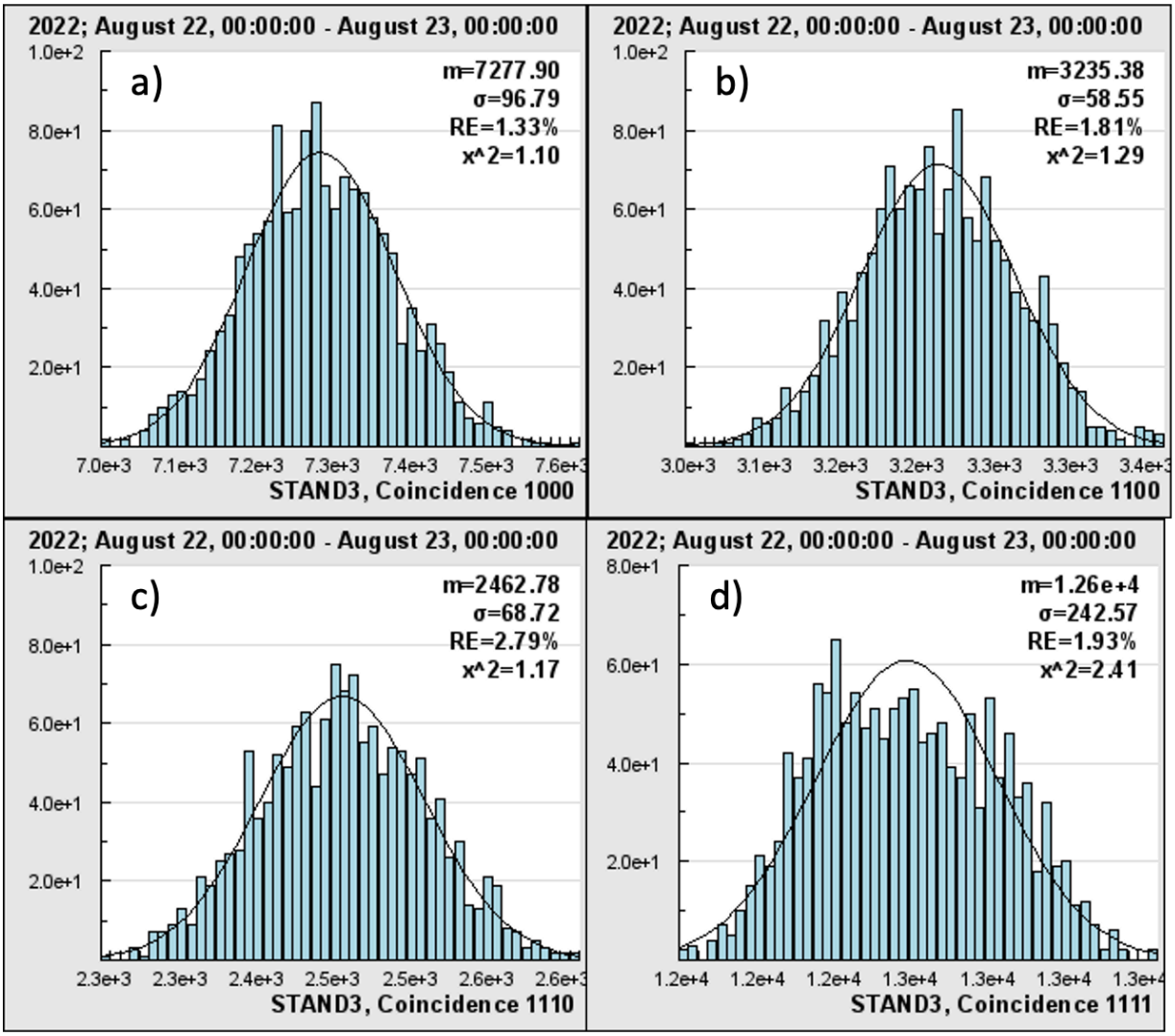

图*6*。**STAND3探测器符合事件的均值、方差和相对误差。2022年8月22日全天，共1440分钟（未对大气压和室外温度进行修正）**

在表4中，我们比较了STAND3符合事件模拟和测得的1分钟计数率。通量差异在20%以内；对于通过WEB计算器 [3] 得到的近似本底通量，以及在计算全天粒子通量时忽略所谓的日波——即由气象条件变化导致的通量日内变化——而言，这一结果令人满意。

表4. 使用 EXPACS 和 GEANT4 进行模拟以及测得的 STAND3符合事件 1 分钟计数率

STAND3/分钟	“1000”	“1100”	“1110”	“1111”
模拟	7278	3235	2197	15328
测量	8617	3464	2463	12600

为证明04:22 – 04:23出现了TGE，我们不固定临界值，而是根据测得的峰值高度计算临界值，见图7。临界值远大于5，相应的p值（错误拒绝H_0的偶然概率）极小。在图9a中，我们给出了临界值为5时对应的偶然概率（错误拒绝H_0的概率仅为三百五十万分之一）。从82（“1000”时间序列中的峰值显著性）到无穷大的高斯积分等于极小的3.8x10- 1461，见图9b。对于如此低的偶然概率，很难提出任何比H_0（该信号仅仅是涨落）更不可能成立的假设。这样的数字动摇了我们对现实的认知。而且这还不是已知的最小数值；我们测得的TGE显著性达到100σ，甚至更高。

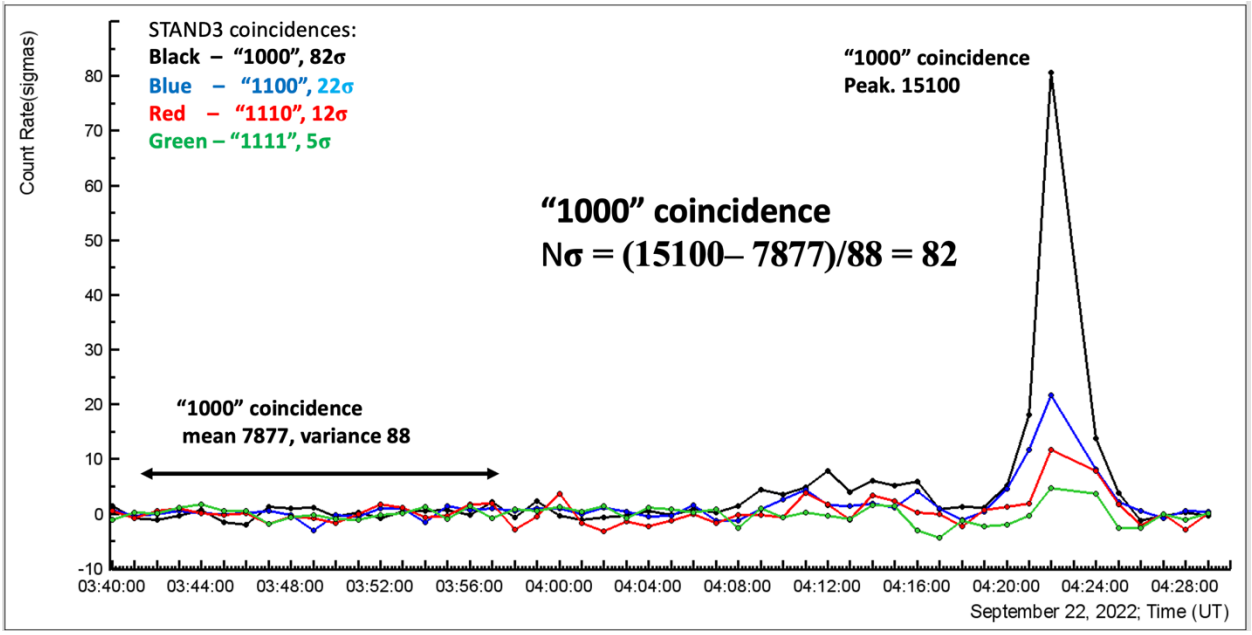

图7. STAND3探测器符合事件计数率的1分钟时间序列，以标准差的倍数表示；临界值，Nσ。

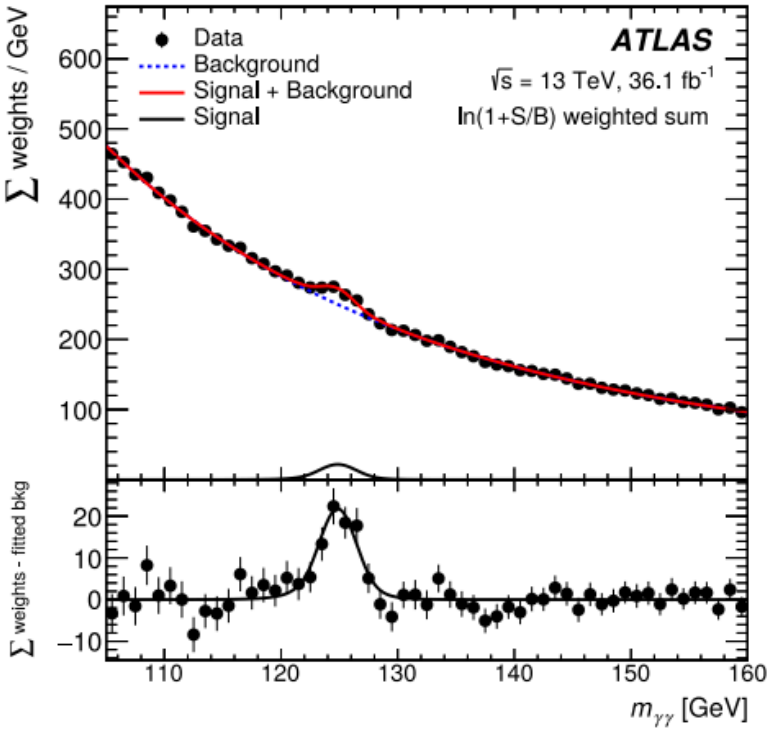

图8. 大型强子对撞机上的ATLAS实验中两个光子的不变质量分布。使用完整的2015+2016 数据集测量H→γγ 。在~125 吉电子伏特的质量处观察到超额。在下图中为扣除背景后的分布。改编自Biglietti等人，2022年，《物理学杂志：会议系列》**1586** 012028

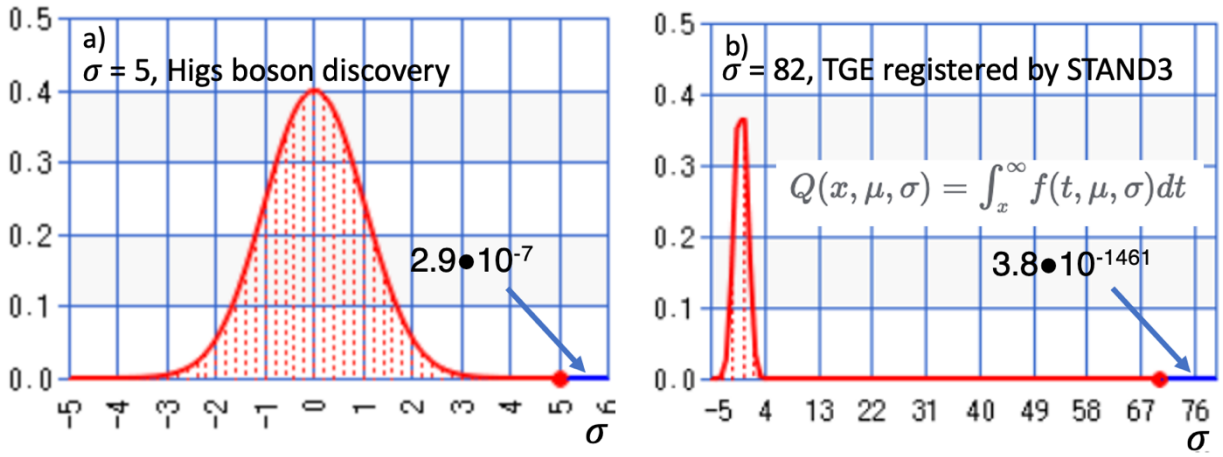

图9. 标准高斯分布展示了希格斯玻色子证据的偶然概率（蓝线）（a），以及STAND3上层闪烁体对TGE的探测（b）。偶然概率由ke!san在线计算器（https://keisan.casio.com/）计算。

5. 观察者对测量分布函数的影响

通常，实验物理学家会对实验数据集应用不同的筛选标准，以获得一个子样本，其中突出的测量结果与总体显著不同。这是常见做法，例如寻找导致超高能宇宙射线的天体、耀斑期间释放的太阳质子、以及不变质量分布中的极大值（相空间中的筛选条件）等。

此类优化的最终目标是获得最显著的“西格玛”（z分数）！物理学家忘记了，如果没有指定基础分布函数，z分数值就没有统计学意义；只有偶然概率才有意义，即错误地拒绝 H_0 假设的概率。

进行 N 次测量时，我们假设所得样本中的随机变量是 IID：相互独立且服从相同分布。我们要寻找与均值显著不同的测量结果（假设服从高斯分布）。在每个样本中，我们都可以找到一个极值（最大值或最小值），用 z 分数（标准化的 N (0,1) 分布）表示极值很方便。然后，我们计算在 H_0 - Ns 条件下得到的值距离均值有多少个标准差。对于 N(0,1) 分布，右尾检验中错误拒绝 H_0 的偶然概率（p值）等于：

$$G^{>N}=\int_{N}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (1)$$

因此，为了获得最大的 z分数并进而得到最小的 p值，我们应用 M 种不同的筛选条件（cuts），由此得到一个样本，其中包含每种筛选条件对应的最大 z分数所对应的 p值，

$$G^{>N_i},\ i=1,\ M. \quad (2)$$

M 次计算所得最大值 N_{max} 的分布函数，可以直接由二项分布得到。

$$GE^{>Nmax}= M\star G^{>Nmax}\,(1- G^{>Nmax})^{M-1}, \quad (3)$$

进行 M 次筛选后，物理学家选取较大的 N_{max}，通常会发表推断称观测到了天体源[13,14], 五夸克[15], 等，其偶然概率是用方程（1）计算的；关键区别在于，使用的是 N_{max}，而不是初始的 N！
但 N_{max} 的分布并不等同于初始测量值的分布，使用方程（1）而非方程（3）计算 p值，可能会得到比使用方程（3）小 2 至 4 个数量级的偶然概率。作为下文 p值错误计算的例子，我们介绍一篇论文，该论文旨在“改进”对 L3探测器在2000年7月14日强太阳耀斑和地面增强（Bastilian GLE）期间探测到的高能质子的探测结果。初始 z分数公布为 4.2[16], ，而经过 4100 次检验后得到的 z分数为 5.7 [17]。

在太阳附近加速的质子，在强烈的太阳事件期间有时会引发大规模

地球大气层中的粒子簇射，并在地球表面产生额外的粒子通量。设于欧洲核子研究中心的L3+C 探测器系统将 L3 谱仪的高精度 μ 子漂移室与地表的空气簇射阵列结合起来。探测器位于日内瓦附近（6.02°E，46.25°N），海拔为海平面以上 450 m，地下约 30 m；对于垂直入射的 μ子，其平均能量阈值约为 20 吉电子伏特。其完整几何接收度为 ~200 m2 sr，覆盖 0° 至 60° 的天顶角范围。安装在 1000 m3、磁场强度为 0.5 Tesla 的系统中的 μ子漂移室，用于记录宇宙线μ子并精确测量其动量。

所有筛选出的事件均按照特定的有效时间间隔以及缪子在地面的到达方向进行分箱。L3+C 数据采集系统采用 0.839 s 的有效时间间隔作为最小时间箱，用于统计该时间间隔内的事件数。将 100 个这样的时间箱合并，形成 83.9 s 的有效时间箱，作为搜索可能信号的基本时间单位。方向余弦 $l = \sin\theta\cos\varphi$ 和 $m = \sin\theta\sin\varphi$ 用于测量缪子的方向，其中 θ 和 φ 分别是缪子方向在地表处的天顶角和方位角。变量 l 和 m 构成的平方区域被划分为 10 x10 个 (l, m) 网格。排除探测器接收度范围内统计量较低的网格单元后，剩下 41 个天空网格单元用于研究。具有相同事件率的方向等值线见 图 1，出自 [17]。超额现象出现的时间恰好与低能太阳质子数量增加达到峰值的时间一致，且发生在 X射线耀斑开始之后。背景分布是在 10:00 UT 前 12 h 的同一天空网格单元中测得的，采用 18.18 min 的有效时间箱。根据拟合均值 255 和 13.7 的标准差，78 个事件的超额对应于 5.7σ 效应。

因此，经过 42 100 5 7 1 ≈ * 次检验后，根据公式 6 10^{-9} 3 2 5 10^{-4}（ ）中的 . s，p值对应于 * 偶然概率；然而，使用正确的公式（ ）计算，结果为 . *，相当于临界值 N_{max} 小于 4s，即低于最初报告的 4.2s。

6. 结论

考虑到大气参数、电子设备或停电以及随机涨落对粒子探测器计数率的所有可能影响后，便可以证明以下说法有效：与新物理现象相关的计数率显著增强。此项推断基于对探测器响应函数的仔细估算、对同一地点不同探测器计数率的比较、大气条件监测，以及对可能错误判定的偶然概率的计算（图 9）。在上一节中，我们展示了施加于初始数据的筛选条件如何人为降低 p值，并导致报告的物理结果显著性被错误夸大。

确立这一新物理现象的后续步骤，涉及揭示这一新现象的起源，包括测量TGE电子和伽马射线的能谱、模拟粒子在大气层中的传播，以及比较模拟结果和实验数据。每一步都有成熟的程序，以确保物理推断正确、可靠。ASNT谱仪能够分别测量电子和伽马射线的能谱。利用这些能谱和GEANT4代码，我们计算TGE电子和伽马射线的预期（建模）计数率，并将其与

实验测得的计数率进行比较。在阿拉加茨宇宙射线观测站，各类粒子探测器同时监测宇宙射线通量和能谱，从而能够进行交叉校准。

关于物理推断技术的详尽展示可见于参考文献[9,11,12], ，其中包含了对希格斯玻色子、引力波以及高海拔宇宙线观测站实验探测到的来自蟹状星云的信号存在性的证明。

致谢

作者感谢A.Kavalov和S.Chilingaryan进行的宝贵讨论。

参考文献

1. A. Chilingarian、K. Avagyan、V. Babayan等，阿拉加茨空间环境中心：现状与太阳高能粒子预报的可能性，《J. Phys. G》29，939（2003）。 2. CRD门户：http://adei.crd.yerphi.am/adei/ 3. T. Sato，用于估算地球宇宙射线天顶角依赖性的解析模型y

通量，《PLOS ONE》11（2016）e0160390。4. GEANT4合作组，GEANT4——一个模拟工具包，《Nucl. Instrum. Meth. A》506（2003）250。5. A.Chilingarian，宇宙射线天体物理学中的数据分析非参数方法：蒙特卡罗统计推断的应用理论，2004年，ISTC A757项目，http://crd.yerphi.am/Monogram 6. A. Chilingarian、G. Hovsepyan、D. Aslanyan、T. Karapetyan、Y. Khanikyanc、L.Kozliner、B. Sargsyan、S.Soghomonyan、S.Chilingaryan、D.Pokhsraryan和M.Zazyan（2022年），雷暴地面增强：对12年观测结果的多变量分析，《Physical Review D》106，082004（2022年）。7. E. L. Lehmann，1993年，“Fisher、Neyman-Pearson假设检验理论：一种理论还是两种？”，《J. Amer. Statist. Assoc》88，1242。8. Biglietti等，2022年，《物理学杂志：会议系列》1586卷012028。9. S. Manzoni，2019年，使用ATLAS第二轮运行数据通过光子研究物理学，ISSN 2190-5053，Springer Theses，ISBN 9788 103030243692 101007978303024370----https://doi.org/./----。 Astone, P.、D’Agostini, G.，在探测器灵敏度极限下推断泊松过程的强度，CERN-EP/99-126，1999年。证明_于+物理学 11. B. P. Abbott等，2020年，LIGO–Virgo探测器噪声及瞬态引力波信号提取指南，《Class. Quantum Grav.》37，055002。12. Nie L、Liu Y、Jiang Z和Geng X.，来自蟹状脉冲星风云的超高能伽马射线辐射，2022年。《The Astrophysical Journal》924，42 13. Abraham等，（2007年），最高能宇宙射线与位置之间的相关性

附近活跃星系核，《天体粒子物理学》29 (2008) 188–204。14. A.Chilingarian, G.Karapetyan 等，《宇宙射线点源信号估计的统计方法》，(2006)《天体粒子物理学》，《天体粒子物理学》25，第269-276页15. 15，C. Seife，稀世珍闻，抑或统计幻象？五夸克仍未现身，《科学》306 (2004) 1281。

16. P. Achard 等，2000年7月14日的太阳耀斑（L3+C 探测器结果），《天文学与天体物理学》

17. Wang R. 2000年7月14日的太阳耀斑是否将质子加速至 P40 GeV？《天体粒子物理学》31 (2009) 149–155