



2023年校园宇宙线观测暑期学校

探索宇宙 从宇宙线观测开始

8月24-27日 成都

主办单位

校园宇宙线观测联盟

承办单位

《现代物理知识》编辑部 西南交通大学物理科学与技术学院

支持单位



国科大关心下一代工作委员会



中国科学院大学教育基金会
University of Chinese Academy of Sciences Education Foundation



国家高能物理科学数据中心
National HEP Data Center

实验介绍与数据处理

——方向重建与坐标转换

中国科学院高能物理研究所
校园宇宙线观测联盟技术组
高卫、刘佳、武莎

前期需掌握的知识



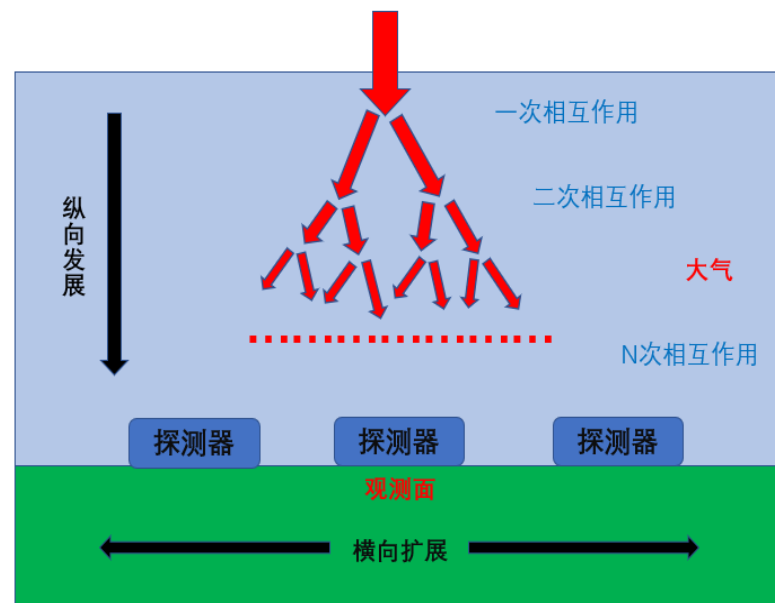
广延大气簇射



天球坐标系

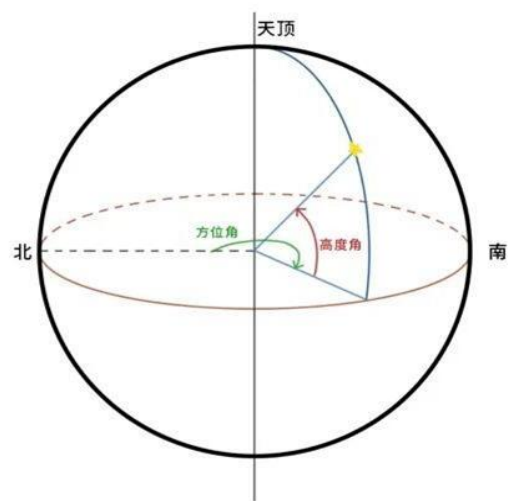
广延大气簇射

- 高能原初宇宙线穿过大气层时与大气中的原子核碰撞产生次级粒子，次级粒子继续与空气核碰撞产生新的粒子，经过多次倍增，转换成了数量巨大的低能次级粒子。
- 地面实验探测到的是次级粒子，间接得到原初宇宙线的信息。



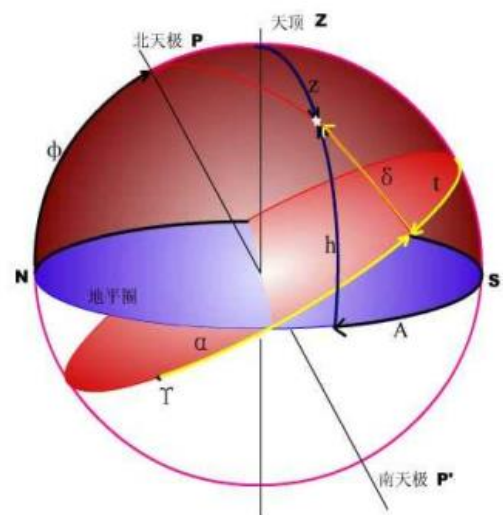
常用的天球坐标系

地平坐标系



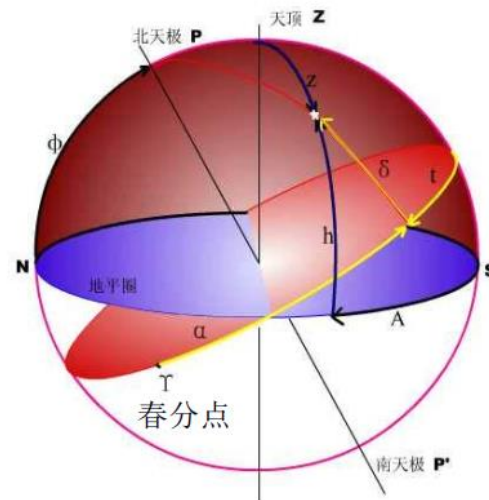
方位角 A
天顶角 z /高度 h

时角坐标系



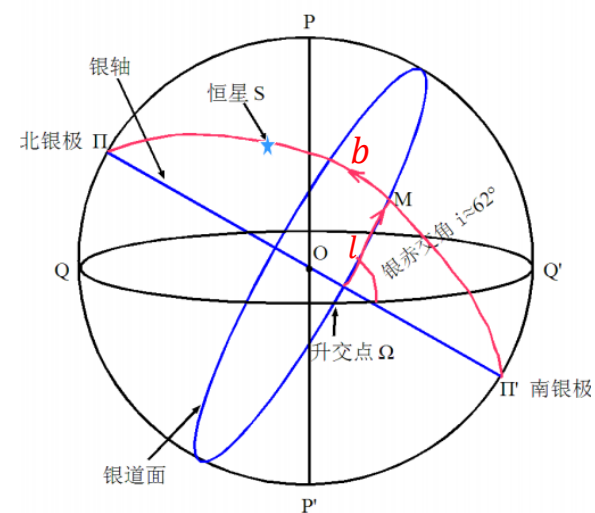
时角 t 、赤纬 δ

赤道坐标系



赤经 α 、赤纬 δ

银道坐标系



银经 l 、银纬 b

	地平坐标系	时角坐标系	赤道坐标系	银道坐标系
基本点	天顶、天底	天极	天极	银极
基本圈	真地平	天赤道	天赤道	银道面
原点	北点	子午圈与天赤道南边的交点	春分点	银河系中心方向
纬圈	地平高度 h ，自真地平向天顶度量为正（ $0^\circ - \pm 90^\circ$ ）	赤纬 δ ：由天赤道沿过天体的赤经圈向两极方向度量（ $0^\circ - \pm 90^\circ$ ）	同“时角坐标系”	银纬 b ：由银道向北（南）度量（ $0^\circ - \pm 90^\circ$ ）
经圈	方位角 A ，北点顺时针量度量（ $0^\circ - 360^\circ$ ）	时角 t ：由原点沿天赤道顺时针量至天体所在赤经圈（ $0h - 24h$ ）	赤经 α ：由春分点沿天赤道逆时针方向量至天体所在赤经圈（ $0h - 24h$ ）	银经 l ：由银河系中心逆时针度量（ $0^\circ - 360^\circ$ ）
应用	天文航海、天文航空、人造地球卫星观测及大地测量等	观测恒星、星云、星团等遥远天体常常采用赤道坐标系，被广泛应用于天体测量和天体物理学中		对银河系的观测，则要采用银道坐标系

坐标转换

几个坐标系原则上都可以相互换算，宇宙线实验用得最多的是地平坐标系与赤道坐标系，赤道坐标系与银道坐标系之间的换算。这些换算关系都有公式可查。

地平坐标 (z, A) $\rightarrow$ 时角坐标 (t, δ)

$$\sin \delta = \sin \varphi \cos z - \cos \varphi \sin z \cos A$$

$$\cos \delta \sin t = \sin z \sin A$$

$$\cos \delta \cos t = \sin \varphi \sin z \cos A + \cos z \cos \varphi$$

时角坐标 (t, δ) $\rightarrow$ 地平坐标 (z, A)

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t$$

$$\sin z \sin A = \cos \delta \sin t$$

$$\sin z \cos A = -\sin \delta \cos \varphi + \cos \delta \sin \varphi \cos t$$

时角坐标 $\rightarrow$ 赤道坐标

左手系到右手系

地方恒星时 local sidereal time——春分点

的时角 t_r

$$\alpha = t_r - t$$

赤道坐标 $\rightarrow$ 银道坐标

$$\sin(l_N - l) \cos b = \cos \delta \sin(\alpha - \alpha_P),$$

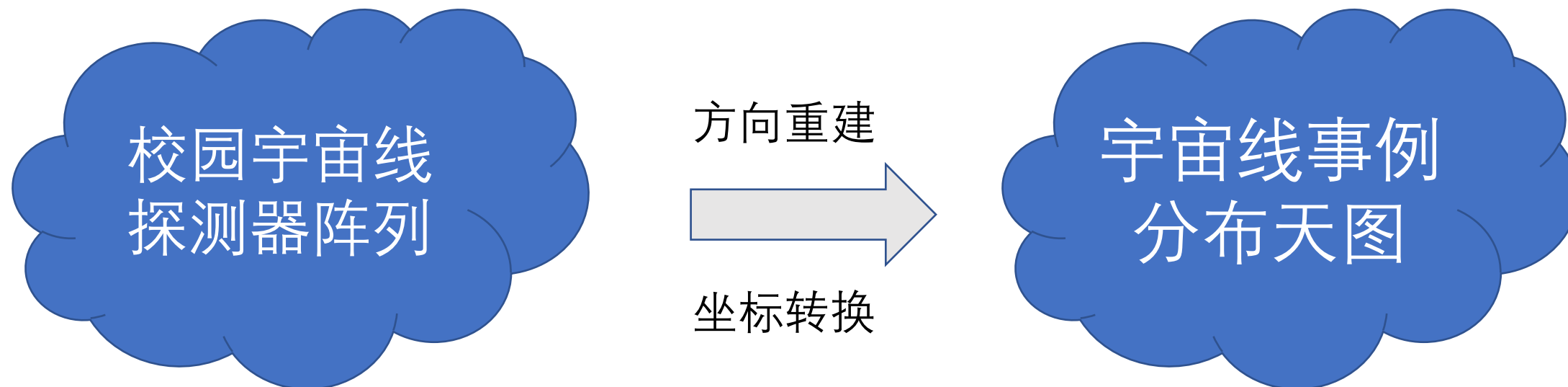
$$\cos(l_N - l) \cos b = -\cos \delta \sin \delta_P \cos(\alpha - \alpha_P) + \sin \delta \cos \delta_P$$

$$\sin b = \cos \delta \cos \delta_P \cos(\alpha - \alpha_P) + \sin \delta \sin \delta_P$$

北银极坐标: $\alpha_P = 12^{\text{h}}51.4^{\text{m}}$, $\delta_P = 27^\circ 08'$

北天极银经: $l_N = 123.0^\circ$

如何处理数据？



探测器介绍



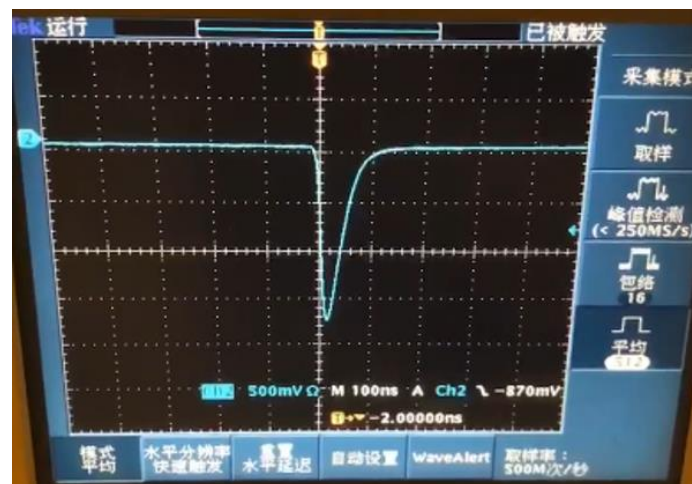
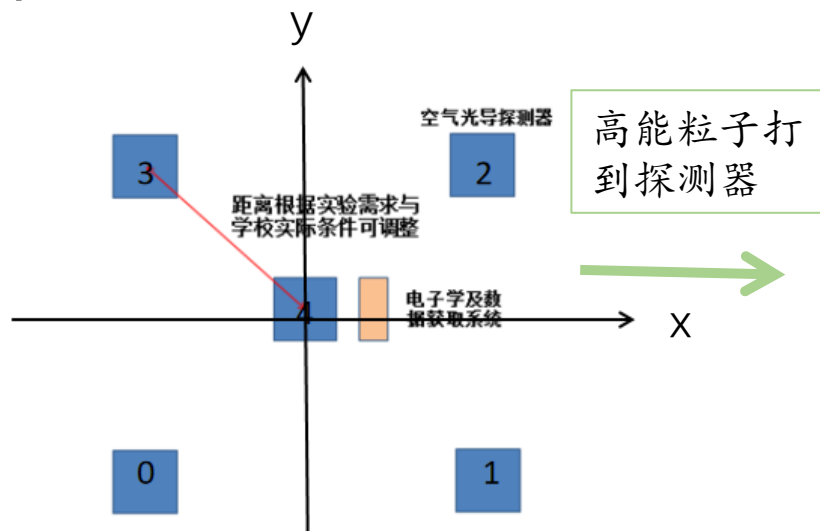
原始数据信息

事例信息:

ev_time:事例触发时间

ch_t:探测器的着火时间

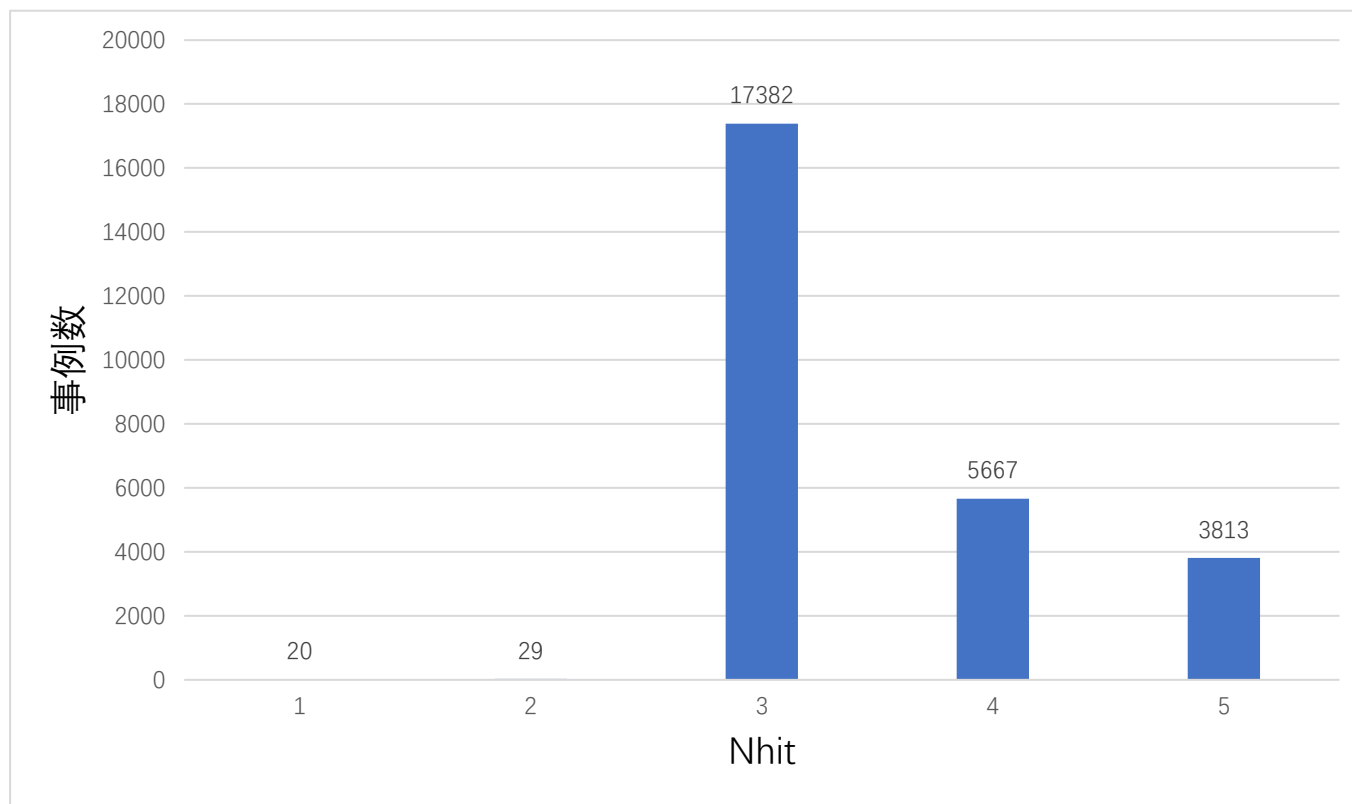
ch_w:探测信号大小



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	ev_time_s	ev_time_ns	trg_num	ch0_t2	ch0_w	ch1_t2	ch1_w	ch2_t2	ch2_w	ch3_t2	ch3_w	ch4_t2	ch4_w
	1640507663	411460000	36582	98	114	96	70	94	40	98	56	0	0
	1640507667	171118272	36583	100	78	102	78	0	0	0	0	98	78
	1640507669	454696256	36584	0	0	0	0	96	48	94	96	100	104
	1640507677	284854880	36585	100	64	0	0	0	0	94	80	102	36
	1640507679	297298240	36586	104	32	104	82	0	0	118	38	106	40
	1640507684	210048128	36587	112	8	0	0	84	38	0	0	94	34
	1640507689	601845216	36588	118	22	0	0	118	20	116	24	0	0
	1640507696	137718176	36589	0	0	118	38	0	0	116	58	108	102
0	1640507699	937017504	36590	0	0	0	0	106	24	110	32	106	52
1	1640507700	52130144	36591	98	58	96	36	0	0	104	30	98	44
2	1640507712	504396064	36592	0	0	116	52	0	0	112	62	110	90

着火探测器数目分布

- 2021年12月26日-27日，取数时间138600s(1.6天)，事例数26900。



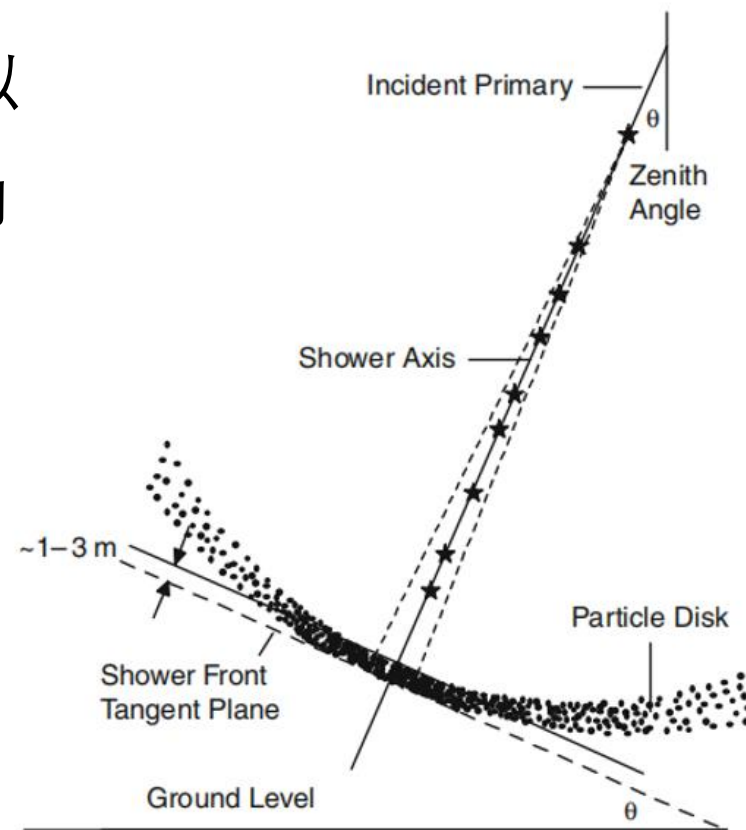
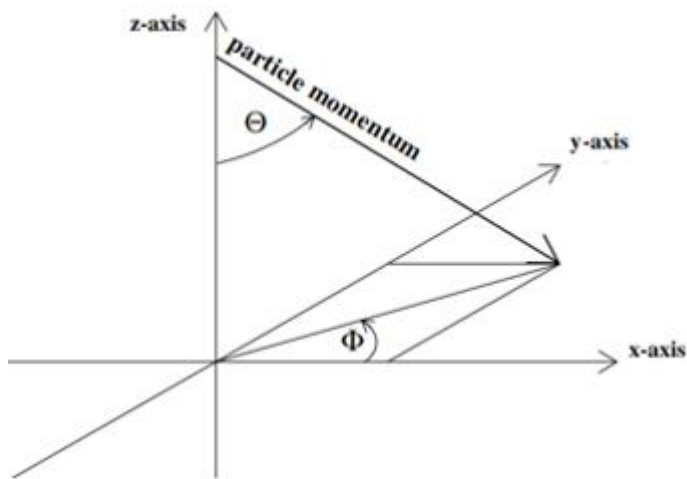
广延大气簇射的特点

原初宇宙线经过大气簇射产生的次级粒子基本上分布在一很薄的圆盘上，这个圆盘可以近似为一个平面。



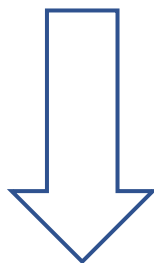
如何表示宇宙线的方向？

根据不同探测器测量到时间延迟，可以求解次级粒子所在的平面，进而得到事例的原初方向。

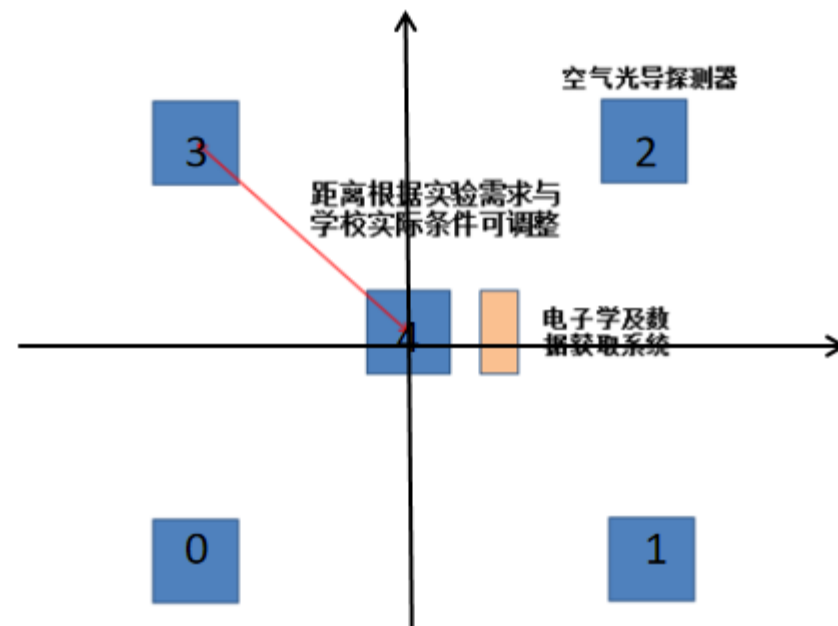


确定数据筛选条件

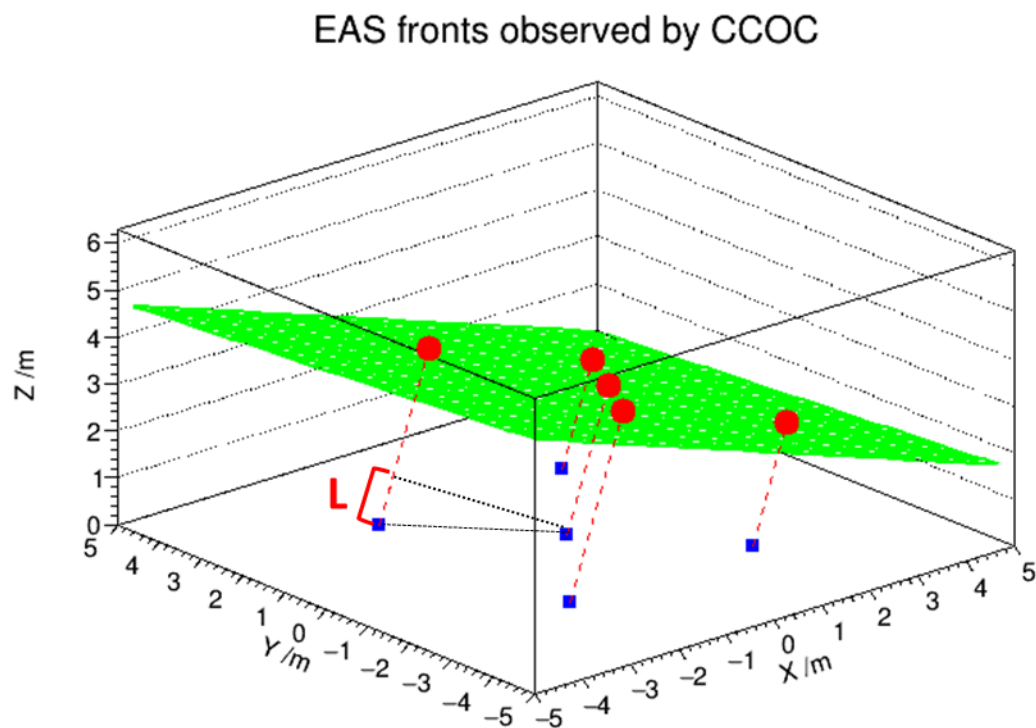
不共线的三个点确定一个平面



$N_{hit} \geq 3$, 3台不在同一条线上



方向重建（平面法向量）



已知:

每台探测器的坐标 (X_i, Y_i, Z_i)

着火探测器着火时间 t_i

求解: 平面法向量 (l, m, n)

$$t_i = t_0 + \frac{L}{c}$$

$$L = l \times (X_i - X_0) + m \times (Y_i - Y_0) + n \times (Z_i - Z_0)$$

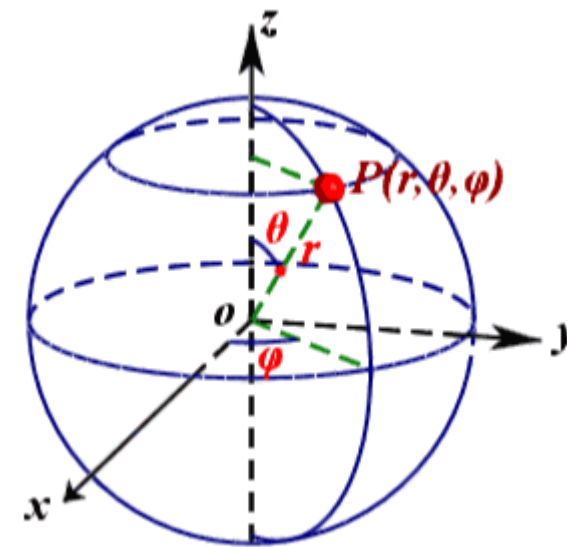
$$L = l \times (X - 0) + m \times (Y - 0) + n \times (Z - 0)$$

$$= l \times X + m \times Y$$

$$t_i = t_0 + \frac{l \times X + m \times Y}{c}$$

方向计算示例

探测器编号	0	1	2	3	4
X/m	-1.9	1.9	1.9	-1.9	0
Y/m	-2.285	-2.285	2.285	2.285	0
t/ns	97.0	100.6	0.0	0.0	95.8



$$\begin{cases} 97 = t_0 + \frac{-1.9 \times l - 2.285 \times m}{c} \\ 100.6 = t_0 + \frac{1.9 \times l - 2.285 \times m}{c} \\ 95.8 = t_0 + \frac{0 \times l + 0 \times m}{c} \end{cases}$$

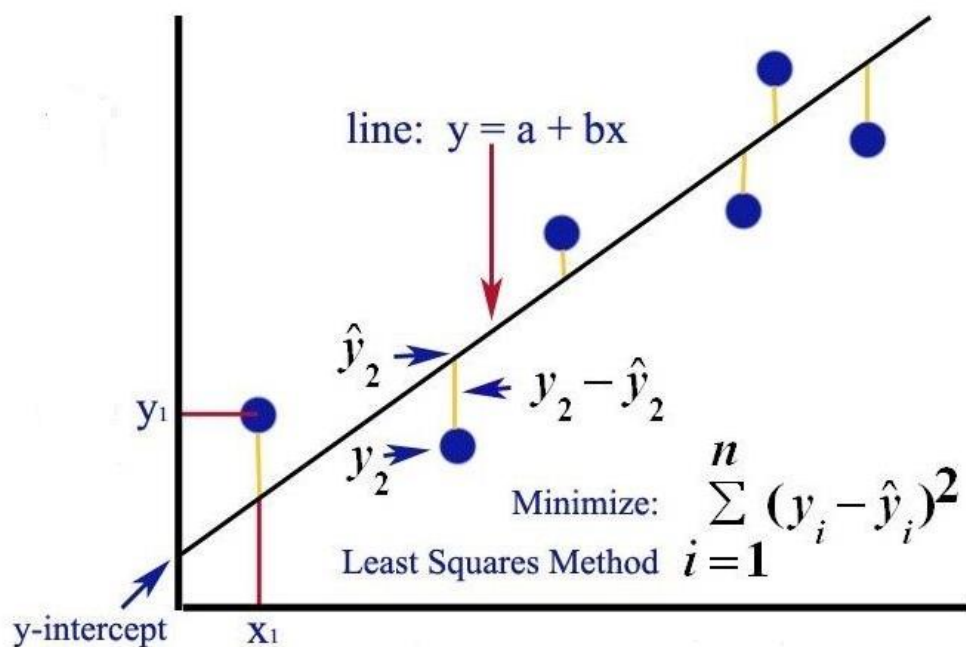
$$l = 0.284, m = 0.394$$

$$\begin{cases} l = \sin \theta \cos \varphi \\ m = \sin \theta \sin \varphi \end{cases}$$

$$\theta = \arcsin(\sqrt{l^2 + m^2}) \sim 29.1^\circ$$

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{m}{\sqrt{l^2 + m^2}}\right) \sim 306.3^\circ$$

通过最小二乘法计算于现有数据最佳拟合的结果。



- 线性回归方程的公式：

$$\begin{cases} \hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} \\ \hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x}. \end{cases}$$
$$\hat{y} = \hat{b}x + \hat{a}$$

- 方向重建是多元的线性回归过程

EXCEL批量重建宇宙线事例方向（方位角、天顶角）

P2																									
=INDEX(LINEST(N(OFFSET(A2,0,SMALL(IF(A2:E2,COLUMN(A2:E2)),ROW(INDIRECT("1:"&G2)))-1)),N(OFFSET(\$I\$2,{0,1},SMALL(IF(A2:E2,COLUMN(A2:E2)),ROW(INDIRECT("1:"&G2)))-1))/0.2998,TRUE),2))																									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1	t0 /ns	t1 /ns	t2 /ns	t3 /ns	t4 /ns	Nhlt 探测器编号	0	1	2	3	4	trg_num		I	m	phi0	phi	theta						Time	
2	96.2	94.0	89.3	92.6	0.0		4	X /m	-1.9	1.9	1.9	-1.9	0	36582	-0.21714	-0.27408	-0.90079	4.042388	0.357217					59574.35679	
3	97.0	100.6	0.0	0.0	95.8		3	Y /m	-2.285	-2.285	2.285	2.285	0	36583	0.287761	-0.39207	-0.93764	5.34536	0.507892					59574.35683	
4	0.0	0.0	92.5	91.4	99.0		3							36584	0.090771	-0.91639	-1.47207	4.810934	1.170326					59574.35686	
5	96.0	0.0	0.0	90.6	94.8		3							36585	0.238586	-0.34996	-0.97242	5.310584	0.437357					59574.35695	
6	95.0	102.9	0.0	109.8	99.6		4							36586	0.442635	0.822476	1.077078	1.077078	1.205505					59574.35697	
7	106.2	0.0	108.6	104.5	0.0		3							36588	0.322413	-0.11095	-0.33142	5.951579	0.347947					59574.35709	
8	0.0	0.0	97.8	100.5	101.4		3							36590	-0.22075	-0.2998	-0.9361	4.077699	0.38149					59574.35721	
9	93.4	89.2	0.0	94.1	92.3		4							36591	-0.314	0.060306	0.189749	2.951851	0.325449					59574.35721	
10	94.4	0.0	0.0	94.6	95.9		3							36594	0.230616	0.011652	0.050483	0.050483	0.233013					59574.35738	
Q2																									
=INDEX(LINEST(N(OFFSET(A2,0,SMALL(IF(A2:E2,COLUMN(A2:E2)),ROW(INDIRECT("1:"&G2)))-1)),N(OFFSET(\$I\$2,{0,1},SMALL(IF(A2:E2,COLUMN(A2:E2)),ROW(INDIRECT("1:"&G2)))-1))/0.2998,TRUE),1))																									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1	t0 /ns	t1 /ns	t2 /ns	t3 /ns	t4 /ns	Nhlt 探测器编号	0	1	2	3	4	trg_num		I	m	phi0	phi	theta						Time	
2	96.2	94.0	89.3	92.6	0.0		4	X /m	-1.9	1.9	1.9	-1.9	0	36582	-0.21714	-0.27408	-0.90079	4.042388	0.357217					59574.35679	
3	97.0	100.6	0.0	0.0	95.8		3	Y /m	-2.285	-2.285	2.285	2.285	0	36583	0.287761	-0.39207	-0.93764	5.34536	0.507892					59574.35683	
4	0.0	0.0	92.5	91.4	99.0		3							36584	0.090771	-0.91639	-1.47207	4.810934	1.170326					59574.35686	
5	96.0	0.0	0.0	90.6	94.8		3							36585	0.238586	-0.34996	-0.97242	5.310584	0.437357					59574.35695	
6	95.0	102.9	0.0	109.8	99.6		4							36586	0.442635	0.822476	1.077078	1.077078	1.205505					59574.35697	
7	106.2	0.0	108.6	104.5	0.0		3							36588	0.322413	-0.11095	-0.33142	5.951579	0.347947					59574.35709	
8	0.0	0.0	97.8	100.5	101.4		3							36590	-0.22075	-0.2998	-0.9361	4.077699	0.38149					59574.35721	
9	93.4	89.2	0.0	94.1	92.3		4							36591	-0.314	0.060306	0.189749	2.951851	0.325449					59574.35721	
10	94.4	0.0	0.0	94.6	95.9		3							36594	0.230616	0.011652	0.050483	0.050483	0.233013					59574.35738	
T2																									
=IF(P2^2+Q2^2<1,ASIN(SQRT(P2^2+Q2^2)),0)																									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T					
1	t0 /ns	t1 /ns	t2 /ns	t3 /ns	t4 /ns	Nhlt 探测器编号	0	1	2	3	4	trg_num		I	m	phi0	phi	theta							
2	96.2	94.0	89.3	92.6	0.0		4	X /m	-1.9	1.9	1.9	-1.9	0	36582	-0.21714	-0.27408	-0.90079	4.042388	0.357217						
3	97.0	100.6	0.0	0.0	95.8		3	Y /m	-2.285	-2.285	2.285	2.285	0	36583	0.287761	-0.39207	-0.93764	5.34536	0.507892						
4	0.0	0.0	92.5	91.4	99.0		3							36584	0.090771	-0.91639	-1.47207	4.810934	1.170326						
5	96.0	0.0	0.0	90.6	94.8		3							36585	0.238586	-0.34996	-0.97242	5.310584	0.437357						
6	95.0	102.9	0.0	109.8	99.6		4							36586	0.442635	0.822476	1.077078	1.077078	1.205505						
7	106.2	0.0	108.6	104.5	0.0		3							36588	0.322413	-0.11095	-0.33142	5.951579	0.347947						
8	0.0	0.0	97.8	100.5	101.4		3							36590	-0.22075	-0.2998	-0.9361	4.077699	0.38149						
9	93.4	89.2	0.0	94.1	92.3		4							36591	-0.314	0.060306	0.189749	2.951851	0.325449						
10	94.4	0.0	0.0	94.6	95.9		3							36594	0.230616	0.011652	0.050483	0.050483	0.233013						
S2																									
=IF(P2<0,3.1416-R2,IF(R2<0,6.283+R2,R2))																									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T					
1	t0 /ns	t1 /ns	t2 /ns	t3 /ns	t4 /ns	Nhlt 探测器编号	0	1	2	3	4	trg_num		I	m	phi0	phi	theta							
2	96.2	94.0	89.3	92.6	0.0		4	X /m	-1.9	1.9	1.9	-1.9	0	36582	-0.21714	-0.27408	-0.90079	4.042388	0.357217						
3	97.0	100.6	0.0	0.0	95.8		3	Y /m	-2.285	-2.285	2.285	2.285	0	36583	0.287761	-0.39207	-0.93764	5.34536	0.507892						
4	0.0	0.0	92.5	91.4	99.0		3							36584	0.090771	-0.91639	-1.47207	4.810934	1.170326						
5	96.0	0.0	0.0	90.6	94.8		3							36585	0.238586	-0.34996	-0.97242	5.310584	0.437357						
6	95.0	102.9	0.0	109.8	99.6		4							36586	0.442635	0.822476	1.077078	1.077078	1.205505						
7	106.2	0.0	108.6	104.5	0.0		3							36588	0.322413	-0.11095	-0.33142	5.951579	0.347947						
8	0.0	0.0	97.8	100.5	101.4		3							36590	-0.22075	-0.2998	-0.9361	4.077699	0.38149						
9	93.4	89.2	0.0	94.1	92.3		4							36591	-0.314	0.060306	0.189749	2.951851	0.325449						
10	94.4	0.0	0.0	94.6	95.9		3							36594	0.230616	0.011652	0.050483	0.050483	0.233013						

EXCEL计算宇宙线事例赤经赤纬

- 已知信息:

地理位置: 北京 (116°20'E、39°56'N)

地平坐标: MJD、A、Z (重建后获取)

- 求赤经、赤纬

$$\delta = \sin^{-1} (\sin \mathbf{lat} \cos \mathbf{Z} - \cos \mathbf{lat} \sin \mathbf{Z} \cos \mathbf{A})$$

$$\alpha = \mathbf{LST} - \tan^{-1} \frac{\sin \mathbf{Z} \sin \mathbf{A}}{\sin \mathbf{lat} \sin \mathbf{Z} \cos \mathbf{A} + \cos \mathbf{lat} \cos \mathbf{Z}}$$

$$\mathbf{LST} = (\mathbf{SID} - \mathbf{floor}(\mathbf{SID})) \times 2\pi$$

$$\mathbf{SID} = (\mathbf{mjd} - \mathbf{MJD2000}) \times (366.2422/365.2422) + \mathbf{SID2000} + \mathbf{lon}/2\pi$$

$$\mathbf{MJD2000} = 51544.5 \quad \mathbf{SID2000} = 67310.54841/86400 \quad \mathbf{lon} = 116^\circ 20'$$



文件 开始 插入 页面布局 公式 数据 审阅 视图 帮助



粘贴



剪切



复制



格式刷

剪贴板

等线

11

A

A

B

I

U

A

wén

文

字体

≡

≡

≡

↺

↻

ab

自动换行

≡

≡

≡

↵

↵

合并后居中

对齐方式

常规

%

,

0.00

0.00

数字



条件格式

套用
表格格式

常规

检查单元格

K2

✕

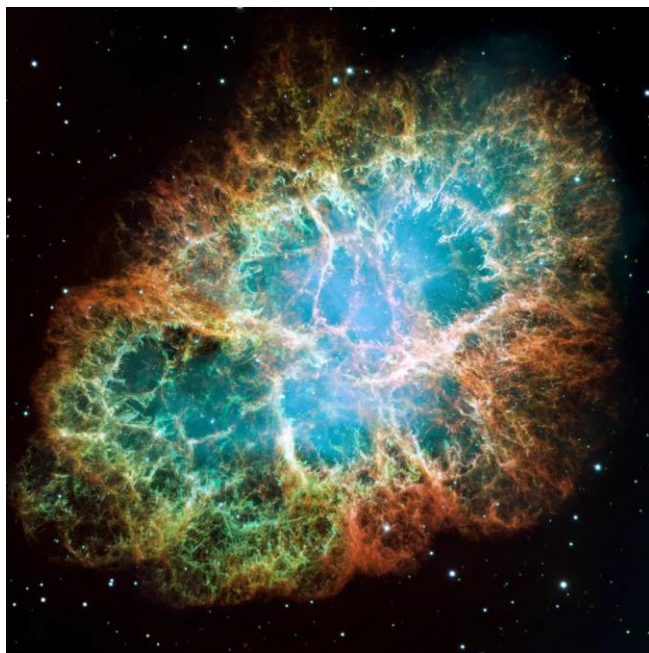
✓

fx

=180/3.1415926*ASIN(SIN(G\$2)*COS(D2)-COS(G\$2)*SIN(D2)*COS(E2))

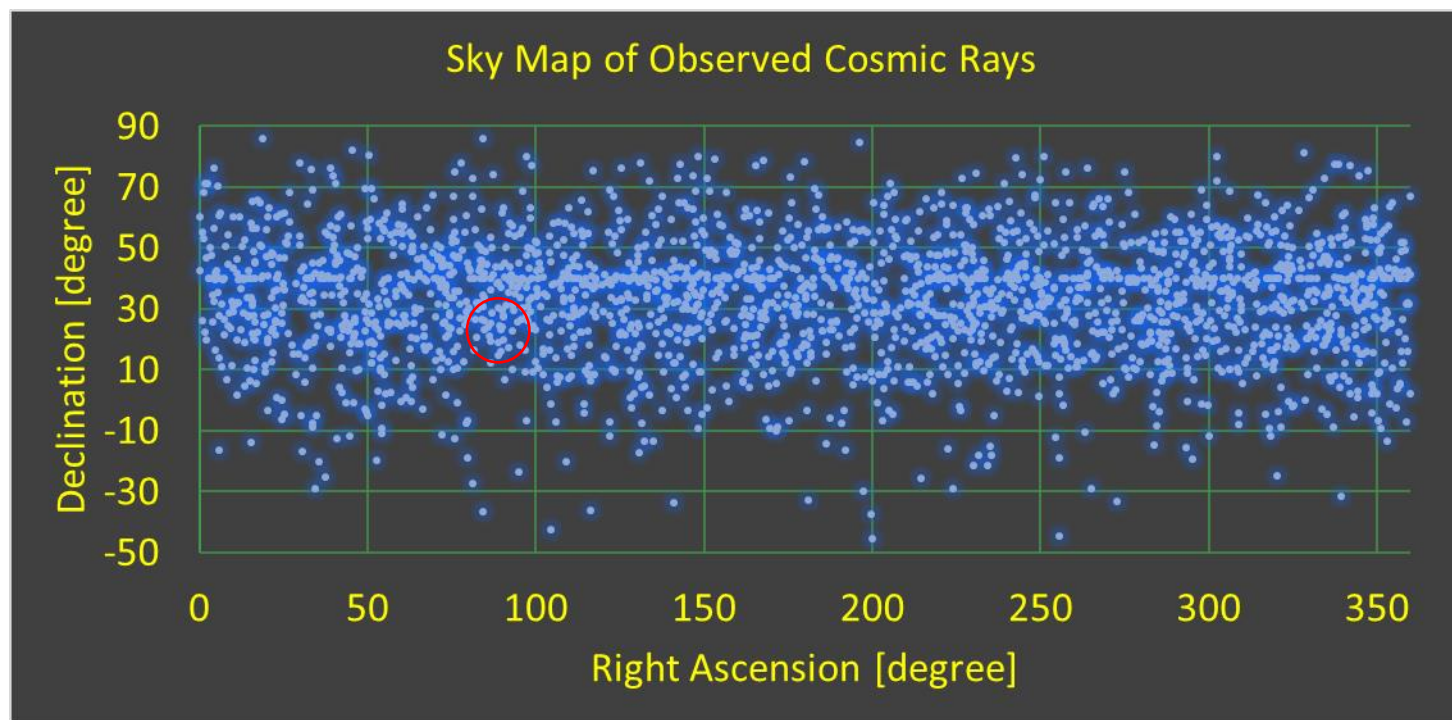
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Time	Nhit	phi/rad	theta/rad	phi/horizontal	longitude	latitude	pai	MJD2000	SID2000	DEC	RA	LST	RAO
2	59574.35679	4	4.042	0.357	-0.901	2.030400	0.696968	3.141593	51544.5	0.779057	25.77732	357.5642	5.931401	357.5642
3	59574.35683	3	5.345	0.508	-2.204						51.39516	18.79602	5.931675	378.796
4	59574.35686	3	4.811	1.170	-1.669						18.64576	55.14825	5.931842	415.1483
5	59574.35695	3	5.311	0.437	-2.169						49.85125	12.77836	5.932413	372.7784
6	59574.35697	4	1.077	1.206	2.065						34.66015	69.19931	5.932559	429.1993
7	59574.35709	3	5.952	0.348	-2.810						58.28112	352.1428	5.933311	352.1428
8	59574.35721	3	4.078	0.381	-0.936						25.24449	359.354	5.934065	359.354
9	59574.35721	4	2.952	0.325	0.190						21.55728	336.2797	5.934073	336.2797
10	59574.35738	3	0.050	0.233	3.091						53.26236	338.9431	5.935154	338.9431
11	59574.35764	3	2.524	0.680	0.617						6.084468	318.6857	5.93675	318.6857
12	59574.35766	5	6.015	0.534	-2.874						68.24511	1.47228	5.936907	361.4723
13	59574.35767	3	6.050	0.777	-2.908						78.72813	36.18073	5.936963	396.1807
14	59574.35797	4	4.264	0.766	-1.122						13.40651	20.25475	5.938867	380.2547
15	59574.3581	5	5.406	0.952	-2.265						50.50477	60.3613	5.939655	420.3613
16	59574.3582	3	4.675	0.333	-1.534						36.6735	4.420492	5.940276	364.4205
17	59574.35821	3	5.931	0.536	-2.789						66.84413	7.019059	5.940372	367.0191

宇宙线事例分布天图



蟹状星云:

R. A. =83.63, Dec=22.02



5个探测器触发的宇宙线事例的分布天图

总结：数据处理流程

