

Helios 飞船观测到的行星际日冕 物质抛射事件^{*}

杜 丹^{1,2} 李昌兴^{1,2} 王 赤¹

¹(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

²(中国科学院研究生院)

摘 要

根据异常低的质子温度判据,从 Helios 1 和 2 飞船等离子体观测数据中 (0.3—1 AU) 识别出大约 160 个行星际日冕物质抛射事件 (ICME),并在统计意义上分析了 ICME 在内日球空间的传播和演化规律.

关键词 太阳风; ICME; 传播和演化

1 引言

日冕物质抛射 (CME) 是太阳大气中一种频繁发生的爆发现象,抛射质量约为 10^{15} — 10^{16} g. 当 CME 进入行星际空间后,即表现为行星际日冕物质抛射事件 (ICME)^{[1],[2]}. 在过去的 30 年中,人们积累了许多 CME 在太阳附近和 ICME 在地球附近的观测资料. 由于日冕物质抛射事件对地球空间环境有重要影响^{[3],[4]},对日冕物质抛射事件及其在行星际空间传播的研究引起了广泛的关注.

目前对于 ICME 的观测还依赖于飞船实地观测的等离子体和磁场数据. ICME 的主要表现特征有^{[2],[4]}: 异常低的质子和电子温度、双向电子热通量 (BDE) 和高能质子流 (BIF)、强磁场、磁场方向的平滑旋转、低的等离子体 β 值、He 丰度增强以及伴随行星际激波等. Cane 和 Richardson^[5] 指出单个的 ICME 很少具备所有的这些特征,并且也没有一个确定的特征在所有的 ICME 中被探测到,有些特征很少出现,然而有些特征如质子温度下降则相对其他特征而言较普遍地存在于 ICME 中^{[5],[6]}. Cane 和 Richardson 利用这个判据识别了地球附近的 ICME,并对其物理特性以及与大角度分光日冕仪 (LASCO) 观测到的 CME 之间的联系做了详细分析.

为了研究 ICME 在行星际空间的传播和演化,一方面,可以利用分布在不同距离处的飞船观测来跟踪一个特定的 ICME. 然而不同日心距处的飞船很少在径向保持一条直线,虽然跟踪特定事件对于研究 ICME 的传播和演化是非常有价值的,但被不同飞船都观测到的特定事件是非常少见的,Paularena 等^[7] 和 Richardson 等^[8] 利用 He²⁺ 丰度增强来跟踪日球空间中一个特定的 ICME 并研究了其演化规律. 另一方面,也可以从统计意义上研究 ICME 的性质随径向距离的变化,如 Liu 等^[9] 利用 He 丰度增强和低的质子温度

* 国家自然科学基金项目 (40204009), 国家杰出青年基金项目 (40325010) 共同资助

2004-03-01 收到原稿, 2004-07-03 收到修定稿

两个判据, 对 Helios 1 和 2, WIND, ACE, Ulysses 观测到的 0.3—5.4 AU 之间的 ICME 做了统计研究. 然而, 利用 He 丰度增强的判据得到的 ICME 只是 ICME 的一个子集. 最近, Wang 和 Richardson^[10] 利用异常低的质子温度对 Voyager 2 在 1—30 AU 的外日球空间观测到的 ICME 进行了系统的识别和演变规律的研究. 本文也仅利用异常低的质子温度作为判据对 Helios 飞船在 0.3—1 AU 的内日球空间观测到的 ICME 进行分析研究, 以便与 Wang 和 Richardson 的外日球空间的结果互为补充, 形成 ICME 在日球空间传播和演化的整体图像.

2 数据分析

Helios 1 和 2 是一对内日球空间探测器 (其轨道如图 1 所示), 探测了 0.3—1 AU 之间的等离子体和磁场等数据, 时间跨度从 1974 年 12 月到 1980 年 12 月, 覆盖了几近半个太阳活动周. Helios 飞船的观测数据为研究 ICME 与太阳活动周的相关性及其在日地行星际空间的传播和演化提供了条件. 本文利用美国国家空间科学数据中心 (NSSDC) 提供的 Helios 1 和 2 的太阳风小时平均数据进行分析研究.

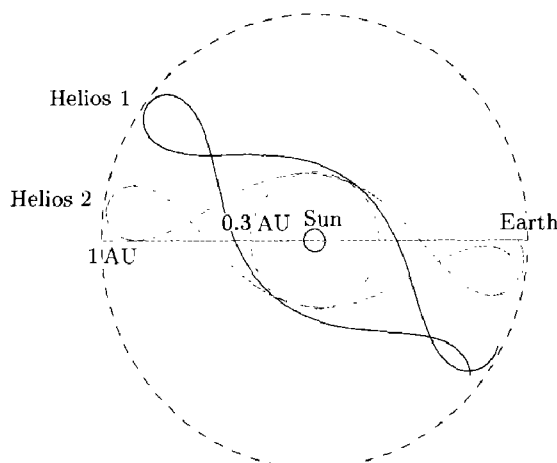


图 1 日地连线固定的共转参考系中 Helios 1 和 2 在 1977 年的轨道

Fig.1 Helios 1 and 2 trajectories in 1977 as seen from a corotating reference frame where the line Sun-Earth is fixed

异常低的质子温度即指等离子体中的质子温度相对于从太阳风正常膨胀中推导出来的预期温度低得多^[6]. 为了确定异常低的质子温度 T_p 的发生区间, 这里利用 Richardson 和 Cane^[6] 的方法, 即逐点比较观测到的 T_p 和从太阳风正常膨胀中推导出来的预期温度 T_{ex} . 预期温度 $T_{ex} (\times 10^3 K)$ 由 Lopez 和 Freeman^[11] 得到的温度与速度的关系式为

$$T_{ex} = \begin{cases} (0.0106v - 0.278)^3 / R, & v < 500 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}; \\ (0.77v - 265) / R, & v \geq 500 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}. \end{cases} \quad (1)$$

计算得到, 其中 R 以 AU 为单位. Richardson 和 Cane^[6] 指出, 关系式中 $1/R$ 的假设是

一个很好的近似, 此关系式可以应用于内日球空间的不同日心距处. 我们采用 Richardson 和 Cane^[6] 的方法, 定义比值 $T_p/T_{ex} \leq 0.5$ 的区间为所感兴趣的低温区间 (这里不考虑持续时间小于 5 h 的区间).

3 ICME 事件列表

本文根据 Helios 飞船的太阳风等离子体和磁场的小时平均观测数据, 利用上节定义的异常低的质子温度做为主要判据来识别可能的 ICME. 首先利用上述判据找到可能是 ICME 的低温区, 接着对低温区做进一步验证: 如果磁场波动幅度较小, 变得更加规则, 而且速度整体呈下降趋势, 该低温区则极可能是 ICME 事件. 值得注意的是, ICME 边界的确定是一件非常困难的工作, 根据不同的特征所确定的边界通常也不同. 这里为简单起见, 选取 $T_p/T_{ex} = 0.5$ 来确定 ICME 的边界. 另外, 在 ICME 事件的边界处, 等离子体或磁场参数可能会出现明显间断. 图 2 给出了发生在 1977 年 7 月 17 日由 Helios 1 观测到的 0.98 AU 处的一次典型 ICME 事件, 虚线之间部分为 ICME. 从上到下, 图中参数依次是太阳风体速度、质子数密度、质子温度 (取对数表示)、磁场强度、 T_p/T_{ex} 比值, 最下面一幅图中的水平直线为限定 ICME 事件边界的 $T_p/T_{ex} = 0.5$ 的直线. 在异常低的质子温度区域, 太阳风体速度大致单调下降、质子数密度较低、磁场波动振幅较小, 由此确定此次事件为 ICME 事件. 此次 ICME 事件持续时间为 11 h, 平均速度为 $393.95 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 由此推得径向宽度为 0.104 AU.

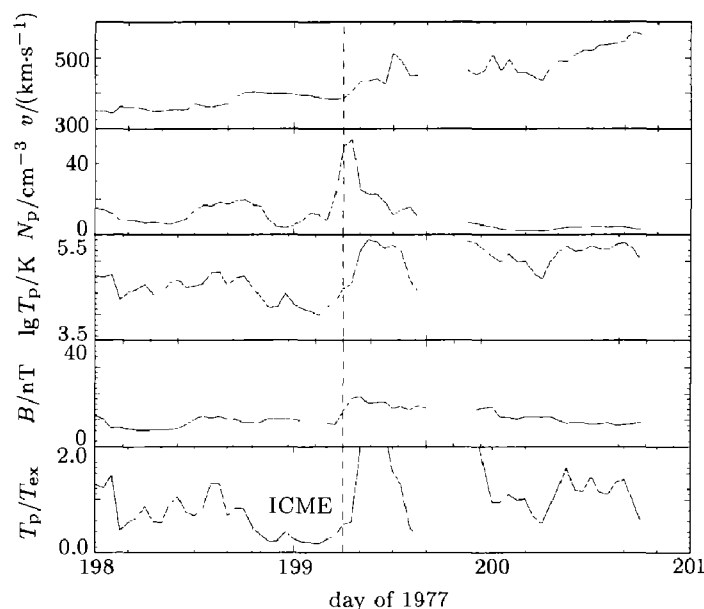


图 2 1977 年 7 月 17 日 19 时, 由 Helios 1 观测到的在 0.98 AU 处的一次典型的 ICME 事件

Fig.2 A typical ICME observed by Helios 1 at 0.98 AU on July 17, 1977

表 1 是用同样方法得到的 Helios 飞船观测到的可能 ICME 事件列表. 前 3 列给出了 ICME 的起始时间, 第 4 列给出了 ICME 的持续时间, 随后的 3 列给出了 ICME 在日面

惯性坐标系下的空间位置(日心距、日面纬度和经度),第8列给出了 ICME 的平均速度,第9列是根据平均速度和持续时间得出的 ICME 的径向宽度,最后一列指出该事件是否在 Bothmer 和 Schwenn^[12] 的文章中被确认为磁云. Bothmer 和 Schwenn 所提到的大部分磁云事件都可在表1中找到. Liu 等^[9] 根据 He 丰度增强和低的质子温度两个判据所给出的 Helios 1 和 2 观测到的 ICME 事件基本包含在表1中,但是也有 Liu 等给出的事件在表1中并不存在,这可能是由于采用了不同的判别标准以及这里限定了 ICME 事件的最短持续时间要超过 5 h,不同于 Liu 等限定的持续时间. 另外,由于用来确定事件边界的标准不同, Liu 等给出的一些 ICME 事件和表1中的一些 ICME 事件的起始时间及持续时间并不完全一致. 应该指出的是表1中的所有事件不一定是 ICME 事件,并且所有的 ICME 事件也不一定都包含在表1中. 我们提到的表1中的 ICME 事件只是表示可能的 ICME 事件.

表 1 0.3—1 AU 之间可能的 ICME, 1974—1980
Table 1 Probable ICME between 0.3—1 AU, 1974—1980

Spacecraft: Helios 1								
Startd time	Duration	Distance	Heliolatitude	Heliolongitude	$\bar{v}$	Radial Width	Notes	
year DOY LT	/h	/AU	/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)	/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	/AU		
1975 8 1200	5	0.92	-2.90	23.80	651.25	0.078		
1975 38 0700	6	0.69	-5.90	54.50	392.79	0.057		
1975 63 1600	11	0.39	-6.40	118.10	469.11	0.124	MC	
1975 77 2200	10	0.32	3.30	206.90	412.77	0.099		
1975 104 0500	10	0.63	6.20	301.20	385.75	0.093		
1975 107 2200	10	0.67			318.44	0.076		
1975 211 0600	11	0.84	-4.10	34.80	517.59	0.137		
1975 212 1400	7	0.83	-4.30	36.10	396.80	0.067		
1975 216 1000	16	0.80	-4.70	40.00	332.96	0.128		
1975 252 0800	9	0.40	-6.70	111.70	519.21	0.112		
1975 255 2000	5	0.36	-5.70	128.00	589.02	0.071		
1975 289 0400	15	0.56	6.80	291.10	416.62	0.150		
1975 320 0800	13	0.86	3.30	332.90	325.84	0.102		
1975 326 0200	14	0.89	2.70	337.90	470.11	0.158		
1975 327 2100	7	0.90	2.60	339.40	600.33	0.101		
1975 330 1600	8	0.92	2.30	341.70	393.50	0.076		
1975 343 0300	18	0.96	1.10	351.10	436.34	0.189		
1976 10 0500	10	0.97	-1.70	13.60	412.42	0.099		
1976 136 1400	11	0.79	4.30	324.10	327.69	0.087		
1976 157 1900	23	0.93	2.10	343.00	363.99	0.201		
1976 185 0200	9	0.98	-0.30	2.70	330.41	0.071		
1976 187 0300	7	0.98	-0.50	4.10	381.80	0.064	MC	
1976 209 0200	7	0.94	-2.40	19.90	351.40	0.059		
1977 7 2300	6	0.98	-0.20	1.80	357.44	0.051		

续表

Start time			Duration	Distance	Heliolatitude	Heliolongitude	$\bar{v}$	Radial Width	Notes
year	DOY	LT	/h	/AU	/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)	/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	/AU	
1977	14	0700	10	0.98	-0.70	6.20	383.27	0.092	
1977	22	1100	5	0.97	-1.40	11.90	433.25	0.052	
1977	29	1100	19	0.95	-2.10	17.00	458.15	0.209	MC
1977	30	2000	12	0.95	-2.30	18.10	431.62	0.124	MC
1977	33	1500	11	0.93	-2.50	20.10	319.21	0.084	
1977	36	0300	10	0.93	-2.70	22.10	477.55	0.115	
1977	55	0200	25	0.81	-4.50	39.00	356.36	0.214	
1977	84	2000	6	0.49	-7.20	87.60	349.81	0.050	
1977	159	1300	11	0.86	3.30	332.40	448.19	0.118	MC
1977	160	0500	9	0.86	3.30	333.10	388.28	0.084	MC
1977	198	1900	11	0.98	-0.30	2.30	393.95	0.104	
1977	217	0300	13	0.96	-1.90	15.20	405.53	0.127	
1977	237	0300	8	0.87	-3.70	31.20	310.23	0.060	
1977	239	0300	10	0.85	-3.90	33.00	287.08	0.069	
1977	268	0600	34	0.58	-6.80	71.50	709.37	0.579	MC
1977	290	0000	7	0.32	-3.10	154.50	672.34	0.113	
1977	333	1200	15	0.73	5.20	315.10	407.77	0.147	
1977	335	1500	38	0.75	4.90	317.80	406.15	0.370	MC
1977	349	0300	16	0.85	3.40	331.90	297.27	0.114	
1978	3	1200	34	0.95	1.60	347.80	725.51	0.592	MC
1978	61	0000	27	0.87	-3.60	30.00	443.97	0.288	MC
1978	65	2200	8	0.84	-4.10	34.50	372.78	0.072	
1978	91	1000	23	0.60	-6.70	67.60	548.99	0.303	
1978	119	1800	7	0.31	0.80	186.00	412.11	0.069	
1978	128	1200	7	0.37	6.30	240.00	411.01	0.069	
1978	131	0900	11	0.40	6.90	253.30	347.42	0.092	
1978	132	1900	12	0.42	7.10	259.00	596.25	0.172	
1978	157	1000	14	0.71	5.30	313.50	296.82	0.100	
1978	169	1700	29	0.82	3.90	327.50	362.46	0.252	
1978	189	1900	31	0.94	1.90	344.90	457.47	0.340	MC
1978	201	2100	16	0.97	0.80	353.70	444.47	0.171	
1978	202	2200	12	0.97	0.70	354.40	462.80	0.133	
1978	233	1900	14	0.95	-2.00	16.20	394.91	0.133	
1978	256	0200	41	0.84	-4.10	34.60	450.60	0.443	
1978	270	0900	15	0.73	-5.50	50.30	360.31	0.130	
1978	283	1300	5	0.57	-6.90	71.50	505.02	0.061	
1978	292	0000	17	0.47	-7.20	92.60	491.65	0.201	MC
1978	306	1600	7	0.31	-2.10	163.50	403.15	0.068	
1978	314	1800	8	0.33	4.40	218.30	446.86	0.086	

续表

Startd time			Duration	Distance	Heliolatitude	Heliolongitude	$\bar{v}$	Radial Width	Notes
year	DOY	LT	/h	/AU	/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)	/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	/AU	
1978	333	0500	5	0.55	6.90	289.10	801.30	0.096	
1978	344	0900	25	0.68	5.70	309.00	388.67	0.233	
1978	354	0000	10	0.77	4.50	321.30	390.21	0.094	
1978	363	0100	68	0.84	3.60	330.60	624.68	1.019	MC
1979	2	1500	29	0.88	3.10	334.80	514.02	0.358	
1979	31	0700	39	0.98	0.50	356.70	423.96	0.397	
1979	33	1700	10	0.98	0.20	358.40	401.97	0.096	
1979	37	0000	20	0.98	-0.10	0.70	333.33	0.160	
1979	40	1200	37	0.98	-0.40	3.10	402.01	0.357	
1979	49	1800	9	0.98	-1.20	9.50	534.87	0.116	
1979	50	1300	11	0.97	-1.30	10.10	545.58	0.144	
1979	58	1300	42	0.95	-2.00	15.90	543.94	0.548	MC
1979	76	0300	9	0.88	-3.60	29.90	392.03	0.085	
1979	84	0700	6	0.82	-4.40	37.50	491.60	0.071	
1979	105	0900	6	0.62	-6.50	65.20	712.71	0.103	
1979	148	2300	12	0.43	7.20	262.10	513.63	0.148	MC
1979	177	1600	11	0.76	4.70	319.60	455.12	0.120	
1979	287	1500	8	0.70	-5.80	52.90	452.61	0.087	
1979	305	0100	7	0.50	-7.20	86.00	342.61	0.058	MC
1980	15	1600	9	0.86	3.30	332.80	346.38	0.075	
1980	47	1700	15	0.98	0.30	357.50	466.56	0.168	
1980	90	0300	29	0.88	-3.50	28.70	491.12	0.342	MC
1980	150	1400	30	0.31	0.90	187.20	454.32	0.327	
1980	172	1100	6	0.53	7.00	286.20	384.06	0.055	MC
1980	196	0800	22	0.79	4.40	323.30	433.56	0.229	
1980	203	1700	24	0.85	3.50	330.70	375.41	0.216	
1980	239	2200	26	0.98	0.10	358.90	384.21	0.240	
1980	248	0100	38	0.98	-0.60	4.50	485.62	0.443	
1980	275	0700	15	0.91	-3.00	24.50	395.29	0.142	
1980	279	1300	13	0.89	-3.50	28.10	417.66	0.130	
1980	287	1400	7	0.83	-4.20	35.30	511.90	0.086	
1980	312	1000	15	0.60	-6.70	68.00	577.34	0.208	
Spacecraft: Helios 2									
1976	59	0000	11	0.82	-6.90	72.60	527.94	0.139	
1976	73	1200	8	0.68	-7.20	89.60	388.07	0.075	
1976	109	0100	5	0.29	5.20	226.10	737.00	0.088	
1976	364	0800	18	0.94	-2.90	23.20	417.08	0.180	
1977	33	0900	27	0.97	-5.40	47.50	433.77	0.281	

续表

Startd time			Duration	Distance	Heliolatitude	Heliolongitude	$\bar{v}$	Radial Width	Notes
year	DOY	LT	/h	/AU	/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)	/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	/AU	
1977	83	1100	8	0.63			408.60	0.078	
1977	95	0600	5	0.48	-6.20	122.10	649.48	0.078	
1977	264	0900	9	0.69	-7.20	88.90	522.85	0.113	
1977	268	2300	12	0.64	-7.20	95.90	584.78	0.168	
1977	284	1500	10	0.43	-5.20	133.30	331.28	0.080	
1977	294	2000	6	0.31	0.70	185.00	439.16	0.063	
1977	316	1400	7	0.47	5.30	313.10	620.33	0.104	
1977	335	2300	37	0.71	1.10	350.90	393.82	0.350	
1977	338	0200	14	0.73	0.80	353.70	426.63	0.143	
1977	354	2100	7	0.87	-1.40	11.00	312.52	0.053	
1977	357	1700	27	0.88	-1.70	13.40	371.73	0.241	
1977	361	2300	8	0.91	-2.10	16.90	361.18	0.069	
1978	4	0600	22	0.94	-2.80	22.50	601.17	0.317	MC
1978	5	2300	14	0.95	-2.90	23.80	573.41	0.193	MC
1978	7	0800	9	0.95	-3.00	24.70	512.01	0.111	
1978	30	0600	12	0.98	-4.70	40.70	561.78	0.162	MC
1978	37	1300	50	0.97	-5.20	45.70	377.63	0.453	MC
1978	56	1100	19	0.91	-6.20	59.60	619.49	0.282	
1978	60	1200	33	0.89	-6.50	62.90	505.35	0.400	
1978	67	1800	49	0.84	-6.80	69.30	493.68	0.581	
1978	100	0400	10	0.51	-6.40	117.20	461.55	0.111	
1978	102	1800	11	0.47	-6.00	124.40	548.68	0.145	
1978	106	1900	8	0.41	-4.80	138.20	421.30	0.081	
1978	108	1900	10	0.38	-4.00	146.40	674.62	0.162	
1978	114	0800	18	0.32	-0.40	176.10	421.14	0.182	MC
1978	123	1700	22	0.30	6.60	245.30	326.65	0.172	
1978	276	0400	19	0.63	-7.20	96.80	406.98	0.186	
1978	315	1400	6	0.36	7.00	282.70	351.01	0.051	
1978	326	2300	21	0.52	4.30	323.10	483.40	0.244	
1978	348	1600	10	0.77	0.20	358.20	466.93	0.112	
1978	350	1100	11	0.78	0.00	0.20	452.55	0.119	
1978	355	0100	14	0.82	-0.60	4.90	466.89	0.157	
1978	365	0100	17	0.89	-1.80	13.90	685.95	0.280	
1979	1	0800	15	0.89	-1.90	15.00	472.49	0.170	
1979	3	1400	13	0.91	-2.20	16.80	454.66	0.142	
1979	6	1400	18	0.92	-2.40	19.20	438.26	0.189	
1979	7	1300	24	0.93	-2.50	19.90	466.68	0.269	
1979	23	0500	27	0.97	-3.80	31.20	414.53	0.269	
1979	31	0600	34	0.98	-4.30	36.80	562.81	0.459	

续表

Startd time			Duration	Distance	Heliolatitude	Heliolongitude	$\bar{v}$	Radial Width	Notes
year	DOY	LT	/h	/AU	/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)	/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	/AU	
1979	35	0000	26	0.98	-4.60	39.30	429.49	0.268	
1979	42	0200	39	0.98	-5.10	44.20	460.02	0.431	
1979	50	2100	24	0.96	-5.60	50.30	434.20	0.250	
1979	78	0100	6	0.82	-6.90	72.70	321.89	0.046	
1979	79	1900	8	0.80	-7.00	74.50	494.06	0.095	
1979	86	1400	15	0.74	-7.20	82.00	704.06	0.253	
1979	93	0200	24	0.68	-7.20	90.60	415.70	0.239	MC
1979	95	2300	26	0.64	-7.20	95.00	571.24	0.356	
1979	114	0400	18	0.41	-4.50	140.80	539.32	0.233	
1979	129	1000	6	0.29	6.10	237.70	668.96	0.096	MC
1979	163	1100	12	0.70	1.10	350.80	442.46	0.127	
1979	165	1900	13	0.73	0.70	353.80	369.13	0.115	
1979	176	0900	19	0.82	-0.70	5.30	369.15	0.168	
1979	235	2000	14	0.96	-5.50	49.70	410.00	0.138	
1979	252	1700	15	0.89	-6.40	62.60	875.50	0.315	
1979	255	0900	24	0.88	-6.50	64.80	696.84	0.401	
1979	296	1200	7	0.46	-5.70	128.00	386.76	0.065	
1979	326	1900	6	0.42	6.10	302.10	308.47	0.044	
1979	364	2300	25	0.84	-1.00	7.90	388.94	0.233	MC
1980	13	0800	14	0.92	-2.40	19.20	473.25	0.159	
1980	32	2200	12	0.98	-4.00	33.20	348.82	0.100	
1980	37	0500	15	0.98	-4.30	36.20	552.81	0.199	
1980	45	2200	11	0.98	-4.90	42.10	407.57	0.108	

4 ICME 的性质

本节将对 Helios 飞船在 0.3—1 AU 的内日球空间观测到的 ICME 的性质进行初步分析研究.

4.1 太阳活动周变化

图 3 给出了每年分别由 Helios 1 和 2 观测到的 ICME 个数及相应的太阳黑子数. ICME 的发生频率似乎与太阳活动周相关. 由于 Helios 2 在 1980 年只有第 1—64 天的数据, 这里只对 Helios 1 观测到的 ICME 进行分析. 发现在太阳活动极大年 (1978—1980) 的 ICME 发生频率比太阳活动极小年 (1975—1976) 大约高 50%. 这与太阳活动极大年 CME 频率较高的观测事实是一致的. 但因为数据太少, 其覆盖时间不到一个太阳活动周的周期, 所以 ICME 的发生频率与太阳周的关系还需进一步考察.

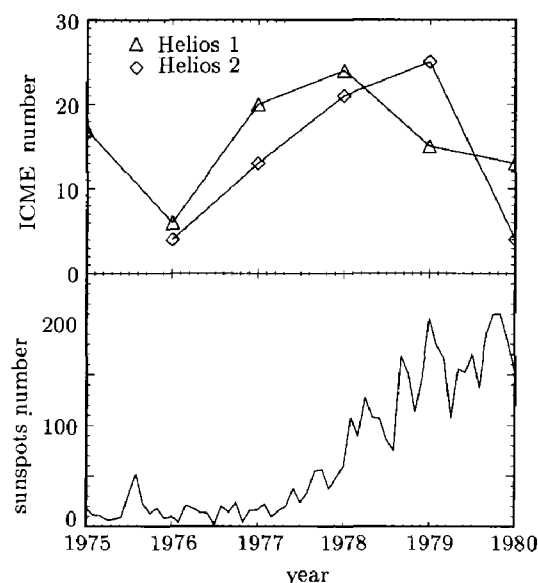


图 3 ICME 发生频率以及太阳黑子数

Fig.3 Yearly averaged occurrence rate of ICME (top panel). Open triangles indicate Helios 1 data, and open diamonds indicate Helios 2 data. The sunspot number is also plotted (bottom panel)

4.2 ICME 的膨胀性质

一般而言, ICME 的前边界比后边界运动得快, 并且其内部压力通常高于背景太阳风, 因此 ICME 在向外传播的过程中会沿着径向膨胀^[4]; 但膨胀到一定程度时, ICME 内外压力平衡, 膨胀将停止. Wang 和 Richardson^[10] 在对 Voyager 2 观测到的 ICME 的研究中指出, 当 ICME 传播到 10 AU 以外时将不再膨胀. 下面我们来研究内日球空间 ICME 的膨胀性质. 首先分析其径向尺度随日心距的演化. 对表 1 中的所有 ICME 事件, 利用线性回归分析得到径向尺度 $S(R)$ 与日心距 R 的关系 (见图 4):

$$S(R) = (0.21 \pm 0.01) \times R^{(0.64 \pm 0.09)} \quad (\text{AU}). \quad (2)$$

式 (2) 表明 ICME 是径向膨胀的, 其径向宽度随日心距增加而增加, 在 1 AU 处约达到 0.21 AU, 与 Cane 和 Richardson^[5] 利用 1 AU 处的卫星数据得到的结果是一致的. 对式 (2) 进行求导从而得到 ICME 在当地的径向膨胀速度: $v_{\text{ex}} = 0.13 v_{\text{ICME}} \times R^{-0.36} \text{ (km} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$, 其中 v_{ICME} 是 ICME 的传播速度, 如果近似取为 ICME 的平均速度, 则可得到 ICME 的径向膨胀速度随日心距的演化关系. 图 5 给出了 ICME 的径向膨胀速度和日心距的关系图, 图中实线为膨胀速度曲线, 虚线为 Alfvén 速度曲线. 其中 Alfvén 速度 $v_A = B/(\mu_0 \rho)^{1/2}$ 与日心距的关系是通过对 Helios 1 和 2 飞船观测到的太阳风数据进行线性回归分析得到的. 由图 5 可以看出, ICME 的径向膨胀速度小于 Alfvén 速度, 这与 Klein 和 Burlaga^[13] 对磁云的研究中所得出的抛射物以小于或与 Alfvén 速度同阶的速度膨胀的结论是一致的.

4.3 ICME 内平均太阳风参数随径向距离的变化

如前所述, ICME 在内日球空间传播时一般是膨胀的. 对于膨胀的 ICME, 人们推测其内部的密度、温度、磁场强度都应该比背景太阳风下降得要快. Liu 等^[9] 在对 0.3—5.4 AU 之间 ICME 的研究中指出, ICME 内部的密度和磁场强度确实比背景太阳风下降得快,

但温度的下降却不如背景太阳风快, 这可能是由于 ICME 与背景太阳风的相互作用造成的. 比较 ICME 和背景太阳风参数的径向演化可以帮助揭示这种相互作用的物理机制.

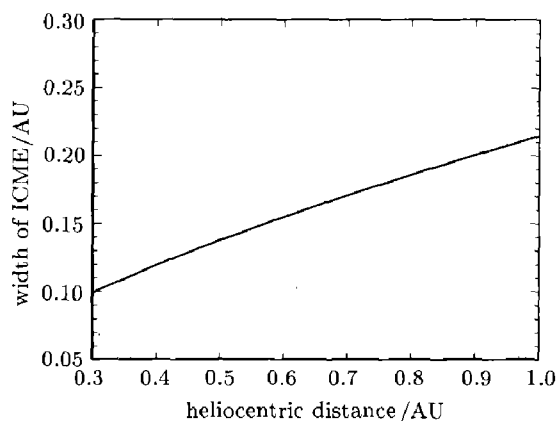


图 4 由 Helios 1 和 2 数据得到的 ICME 的径向宽度和日心距的关系

Fig.4 Radial width of ICME observed by Helios 1 and 2

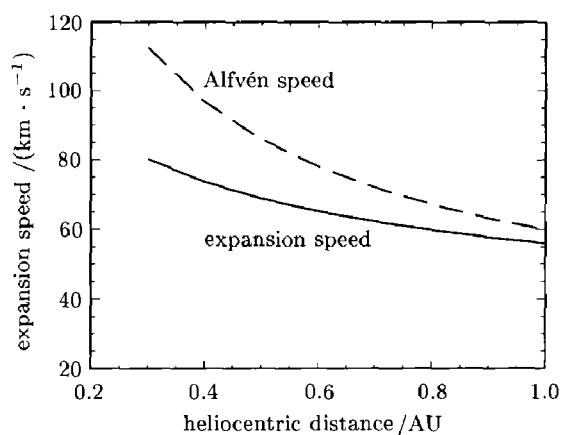


图 5 由 Helios 1 和 Helios 2 数据得到的 ICME 的膨胀速度和日心距的关系

(实线为膨胀速度, 虚线为 Alfvén 速度)

Fig.5 Expansion speed of ICME observed by Helios 1 and 2 (The solid line represents the expansion speed and the dashed line represents Alfvén speed)

下面讨论我们得到的 ICME 内平均太阳风参数随径向距离的变化规律. 根据表 1 所给的 ICME, 利用线性回归分析得到太阳风平均参数: 数密度 N 、体速度 v 、温度 T 和磁场强度 B 随日心距 R 的演化关系 (见图 6):

$$N(R) = (7.49 \pm 0.44) \times R^{(-2.02 \pm 0.13)} (\text{cm}^{-3}), \quad (3)$$

$$v(R) = (434.78 \pm 10.07) \times R^{(-0.039 \pm 0.050)} (\text{km} \cdot \text{s}^{-1}), \quad (4)$$

$$T(R) = (25608.0 \pm 1433.4) \times R^{(-1.01 \pm 0.12)} (\text{K}), \quad (5)$$

$$B(R) = (6.72 \pm 0.43) \times R^{(-1.67 \pm 0.12)} (\text{nT}). \quad (6)$$

图 6 中的实线表示利用表 1 中的 ICME 数据进行幂律拟合得到的 ICME 内平均太阳风参数随径向距离的演化关系, 点线是利用 Helios 飞船观测的太阳风数据进行幂律拟合得到的背景太阳风参数随径向距离的演化关系. 其中第一幅图给出了 ICME 内平均质子数密度的径向演化, ICME 的数密度随径向距离的增加而减少, 由幂律拟合得到的背景太阳风的数密度为 $N = 7.54R^{-2.06} \text{ cm}^{-3}$, 表明 ICME 内的数密度随径向距离的变化大致与背景太阳风数密度的变化趋势一致. 第二幅图表明 ICME 的平均速度随径向距离变化不明显, 与背景太阳风速度基本一致. 第三幅图给出了 ICME 内平均质子温度的径向演化, ICME 内平均质子温度随径向距离的增加而减少, 并且明显低于背景太阳风平均质子温度, 这是由我们所用来自识别 ICME 的判据是异常低的质子温度所决定的. ICME 内平均温度比以 $R^{-0.85}$ 下降的背景太阳风平均温度下降得略快, 这与 ICME 的膨胀一致, 而与 Liu 等^[9] 的结论是不一致的, 可能是由于二者选取 ICME 的判据不同而导致样本的差异所致. 然而, 我们的结果和 Liu 等^[9] 的结果都表明 ICME 温度的下降不及绝热膨胀时温度下降 (以 $R^{-4/3}$ 下降) 得快, 说明 ICME 在膨胀过程中可能存在某种加热机制. 最下端的图说明 ICME 内磁场强度比以 $R^{-1.5}$ 下降的背景太阳风磁场强度下降得略快, 从而也说明 ICME 在传播过程中比背景太阳风膨胀得更快, 这与 Liu 等^[9] 结论是一致的.

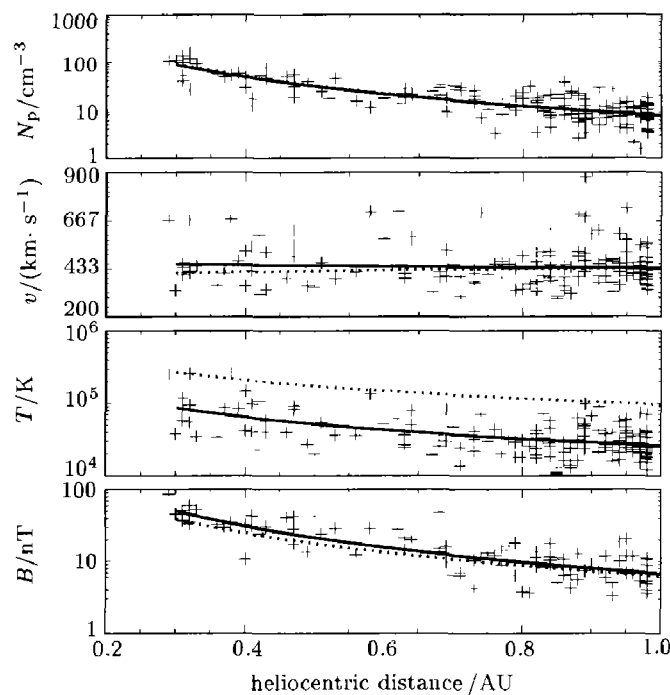


图 6 由 Helios 1 和 Helios 2 数据得到的 ICME 内太阳风的平均参数随日心距变化的关系
(实线为 ICME 数据的幂律拟合曲线, 点线为背景太阳风的幂律拟合曲线)

Fig.6 The radial variation of the average physical conditions inside ICME observed by Helios 1 and 2. Solid lines represent the best fit of a power law to the ICME data, the dotted lines represent the best fit of a power law to the background solar wind

5 总结

本文根据异常低的质子温度的判据,从 Helios 飞船在 0.3—1 AU 的内日球空间的观测数据中识别出大约 160 个 ICME 事件,并在统计的意义上分析了内日球空间的 ICME 性质.

(1) ICME 的发生频率大致与太阳活动周正相关;

(2) ICME 在向外传播的过程中是膨胀的,并且膨胀速度与 Alfvén 速度同阶;

(3) ICME 内的温度和磁场强度下降比背景太阳风下降得快,这与 ICME 的膨胀一致.但温度下降比绝热膨胀时温度下降得慢. ICME 内的数密度并不比背景太阳风中下降得快.

下一步,我们将利用数值模型来研究 ICME 在内日球空间的传播和演化规律,并与本文涉及的观测结果进行比较.

参 考 文 献

- [1] Gosling J T. Coronal mass ejections and magnetic flux ropes in interplanetary space. In: Russell C T, Priest E R, Lee L C ed. *Physics of Magnetic Flux Ropes*, Geophys. Monogr. Ser. Washington D C, 1990, **58**:343—352
- [2] Neugebauer M, Goldstein R. Particle and field signatures of coronal mass ejections in the solar wind. In: Crooker N, Joselyn J A, Feynman J ed., *Coronal Mass Ejections*, Geophys. Monogr. Ser. Washington D C, 1997, **99**:245—251
- [3] Gosling J T, McComas D J, Phillips J L, Bame S J. Geomagnetic activity associated with earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**: 7831—7839
- [4] Gosling J T. Coronal mass ejections: An overview. In: Crooker N, Joselyn J A, Feynman J ed., *Coronal Mass Ejections*. Geophys. Monogr. Ser. Washington D C, 1997, **99**:9—16
- [5] Cane H V, Richardson I G. Interplanetary coronal Mass Ejections in the near-Earth solar wind during 1996—2002. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A4):1156—1168
- [6] Richardson I G, Cane H V. Regions of abnormally low proton temperature in the solar wind (1965—1991) and their association with ejecta. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(A12):23 397—23 412
- [7] Paularena K I, Wang C, Steiger R V, Heber B. An ICME observed by Voyager 2 at 58 AU and by Ulysses at 5 AU. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**:2755—2758
- [8] Richardson J D, Paularena K I, Wang C, Burlaga L F. The life of a CME and the development of a MIR: from the Sun to 58 AU. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A4):1041—1050
- [9] Liu Y, Richardson J D, Belcher J W. A statistical study on propagation of interplanetary coronal mass ejections: from 0.3 to 5.4 AU. *Plan. Space Sci.*, 2004 (in press)
- [10] Wang C, Richardson J D. Interplanetary coronal mass ejections observed by Voyager 2 between 1 and 30 AU. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**:A06 104
- [11] Lopez R E, Freeman J W. The solar wind proton temperature-velocity relationship. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**:1701—1705
- [12] Bothmer V, Schwenn R. The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind. *Ann. Geophys.*, 1998, **16**:1—24
- [13] Klein L W, Burlaga L F. Interplanetary magnetic clouds at 1 AU. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**:613—624

THE INTERPLANETARY MASS EJECTIONS OBSERVED BY HELIOS

DU Dan^{1,2} LI Changxing^{1,2} WANG Chi¹

¹(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences)

Abstract

Using abnormally low proton temperature as the primary identification signature of interplanetary mass ejections (ICME), about 160 probable ICME observed by Helios 1 and 2 between 0.3 AU and 1 AU have been identified. The resulting list of events enables us to study the radial evolution of ICME in a statistical sense.

The occurrence rate of ICME approximately follows the solar activity cycle. ICME expand during propagation in the solar wind; the radial width increase with distance as $R^{0.64}$. The radial expansion speed of the ICME is of the order of the Alfvén speed. The average temperature and magnetic field magnitude inside ICME decrease faster with distance than the ambient solar wind, as expected for an expanding structure. The relatively slower decrease of temperature with distance than the adiabatic expansion solar wind implies a substantial heating of the ejecta. The average bulk speed of ICME remains constant with distance between 0.3 and 1 AU.

Key words Solar wind, ICME, Propagation and evolution