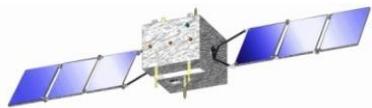


七十三、探测数据对坐标系的依赖性

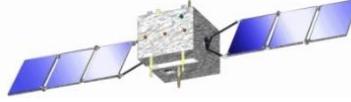


- 宇宙中磁化星球的磁场在不同高度上的强度、磁力线位形和方向通常是不一样的。例如，太阳磁场、木星磁层、土星磁层和地球磁层的磁场都是随高度变化的。
- 除了金星和火星之外，其它行星都有磁场，行星磁层是天然保护屏障，它能够屏蔽一些来自太阳或宇宙的高能粒子。



思考题：行星磁场是如何产生的呢？为什么会“长成”不一样的形状？

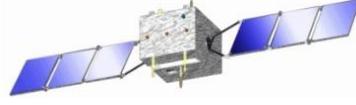
七十三、探测数据对坐标系的依赖性



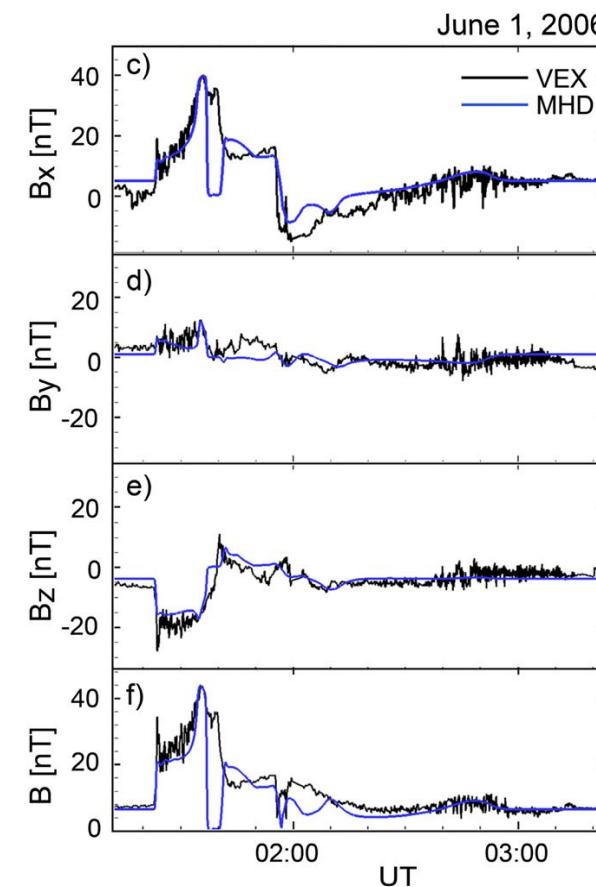
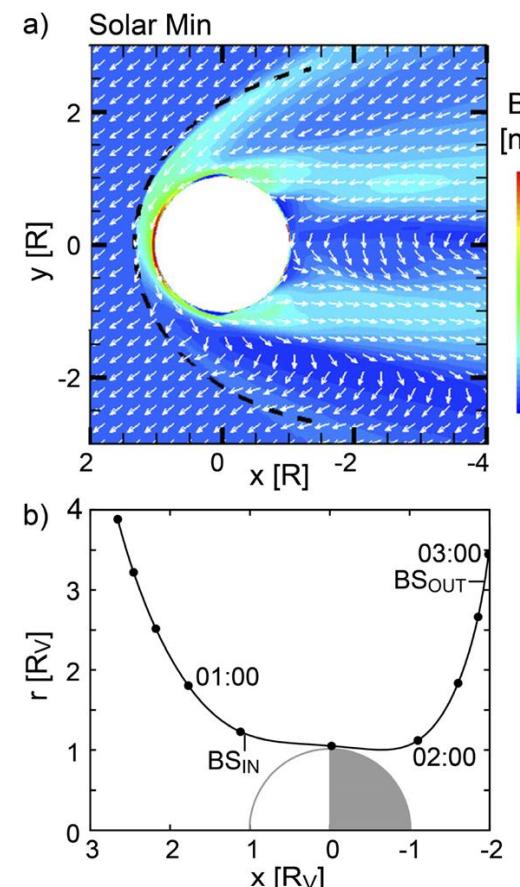
- 行星磁层的分布形状与行星内禀磁场的分布位形、外部太阳风等离子体流作用方向和行星自转角度都有



七十三、探测数据对坐标系的依赖性

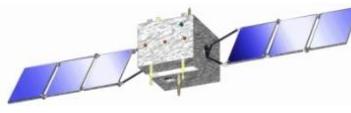


➤ 金星是太阳系中唯一一颗没有固有磁场的行星，金星只存在外部电离层感应磁场。可能因为金星自转速度过慢（慢于公转速度），内部的金属流体不能产生发电机效应？真实原因有待进一步研究。



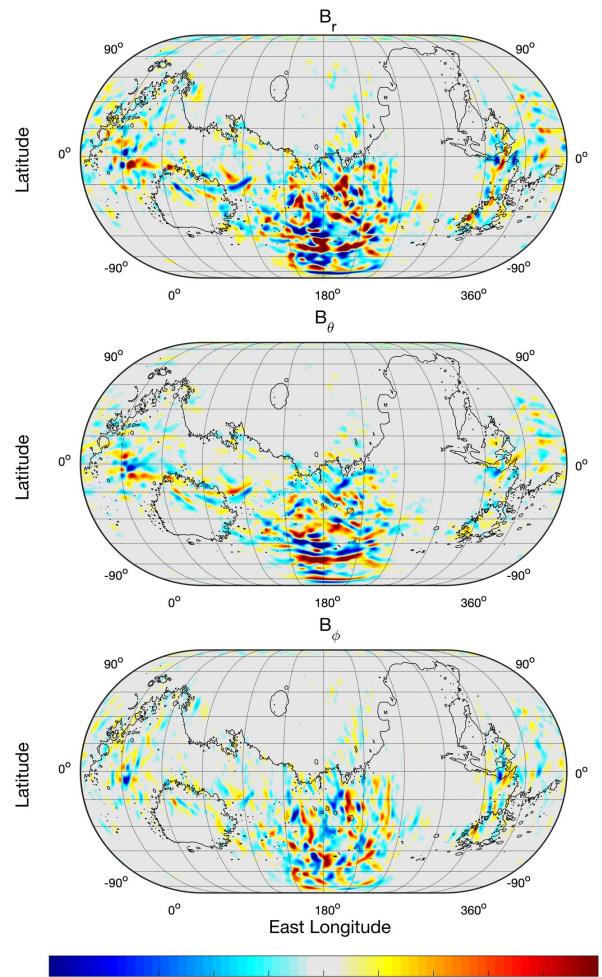
Ma et al. JGR,
2013

七十三、探测数据对坐标系的依赖性



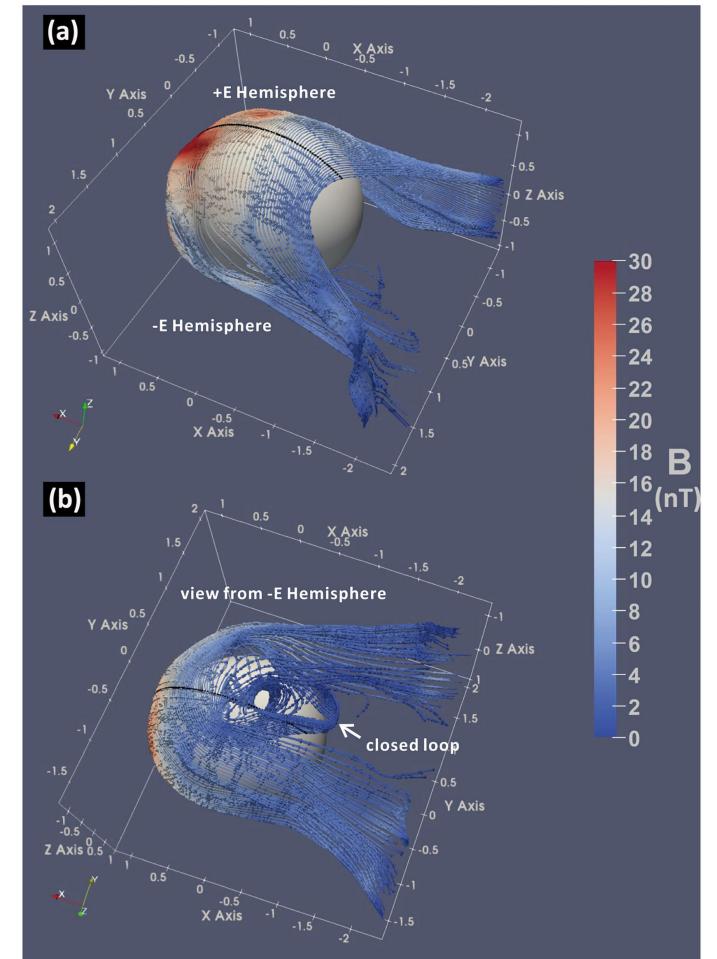
- 火星原本有磁场，但是现在只有南北不对称的数十nT的剩磁和外部感应磁场。
- 可能是火星内部冷却导致其高温导电液体变成了固体，无法继续产生对流？
真实原因有待进一步研究

火星120km高度上的磁场分布

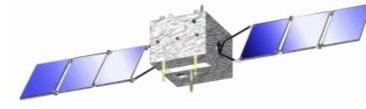


Gao et al., ESS, 2021

火星感应磁场



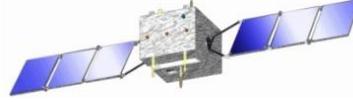
Zhang et al., JGR, 2022



除了中性成分不受磁场的影响之外，其他的带电粒子运动、电磁波的传播和等离子体流速都会受到空间电磁场分布的影响。

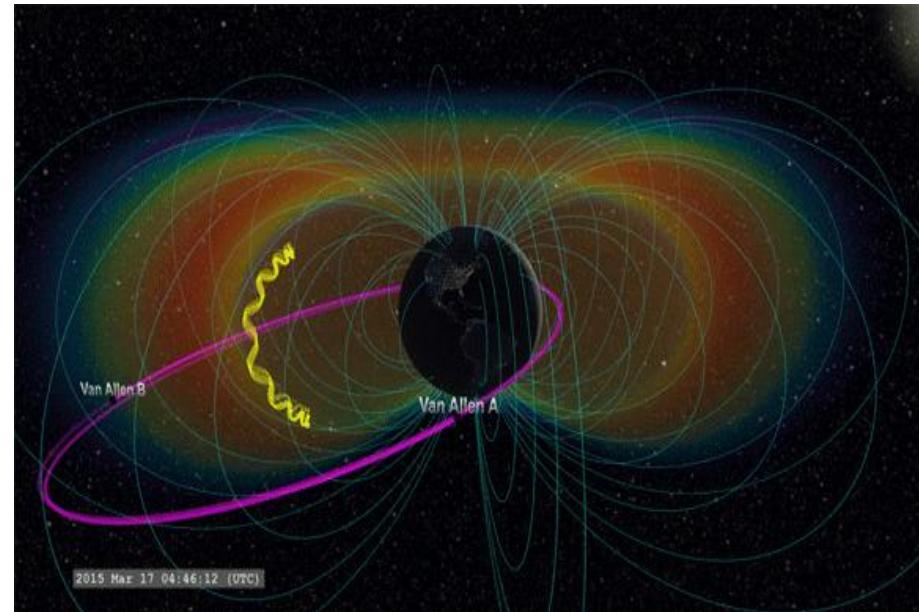
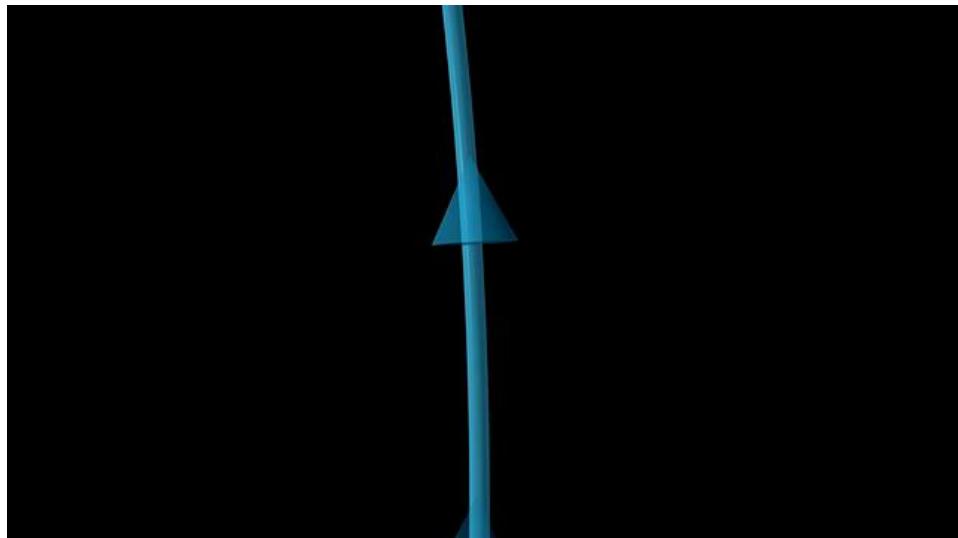
- 相同的空间探测矢量场数据（譬如电磁场矢量、等离子体流速等）在不同的坐标系中通常是不一样的
- 即使对于一些标量场（譬如带电粒子的计数率/通量），只有把数据放在合理的坐标系中，才能够正确地反映出其空间分布规律。
- 把观测数据放在正确的坐标系中会变得更加容易整理，其计算也变得更加简单（徐文耀，2007）。

七十三、探测数据对坐标系的依赖性



- 一个典型例子就是地球辐射带或环电流区域高能粒子（电子和离子）的空间分布在不同坐标系中是不相同的。

动画选自NASA



地球辐射带高能电子的捕获运动：

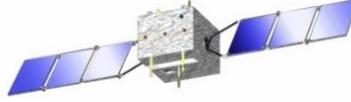
- 围绕磁力线的回旋运动
- 在南北磁镜点之间的弹跳运动
- 围绕地球等磁场值的漂移运动

$$\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B} = \frac{E_{\perp}}{B} = \frac{E \sin^2 \alpha}{B} = \text{常数 (non-relativistic)}$$

$$J = \oint P_{||} dI = 2 \int_{l_{M1}}^{l_{M2}} \gamma m v_{||} dI = \text{常数}$$

$$\Phi = \oint B ds = \text{常数}$$

七十三、探测数据对坐标系的依赖性



➤ 不同经度上的高能质子随高度的变化曲线不一样，但随着磁场强度的变化是一致的

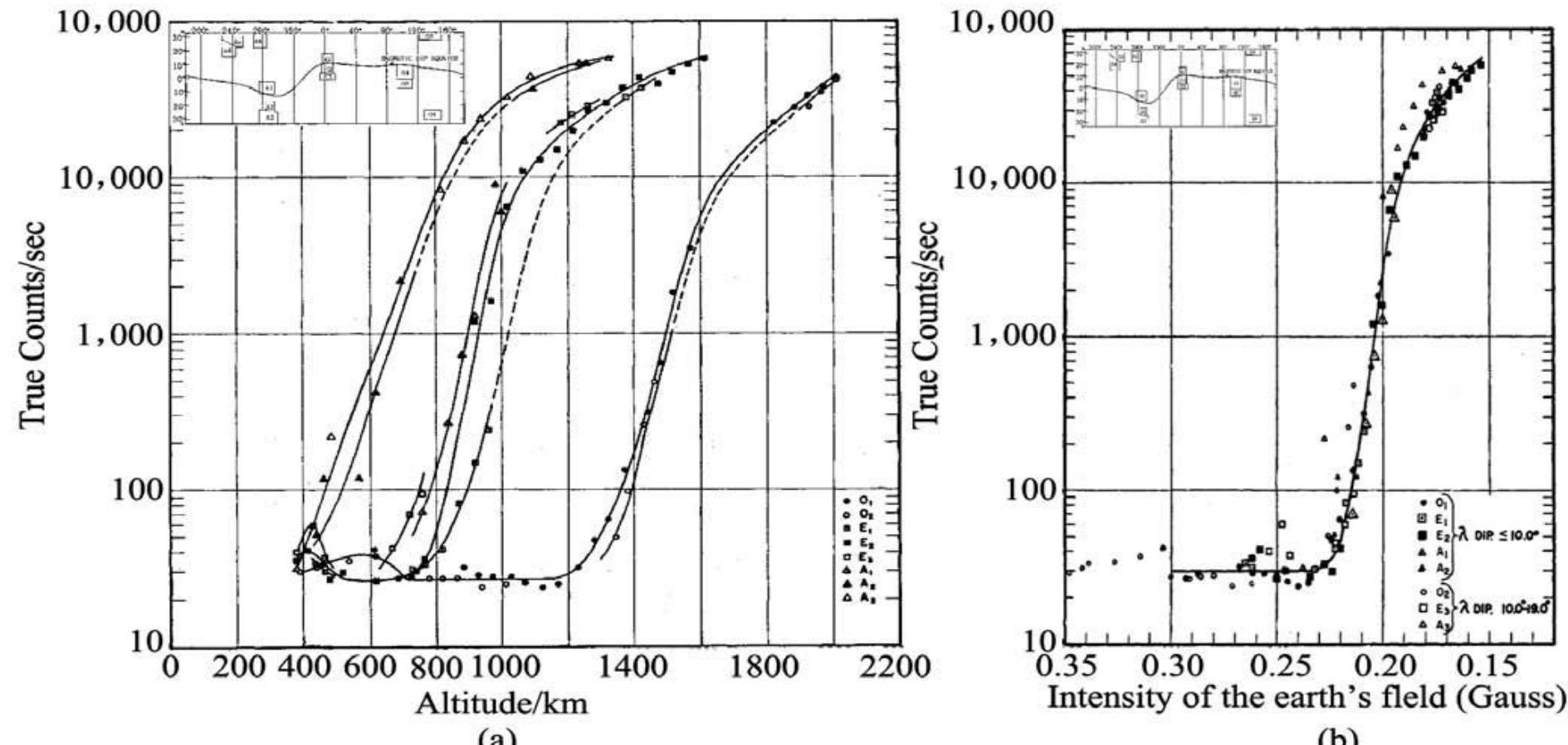
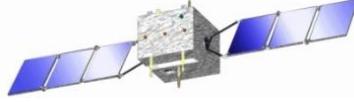
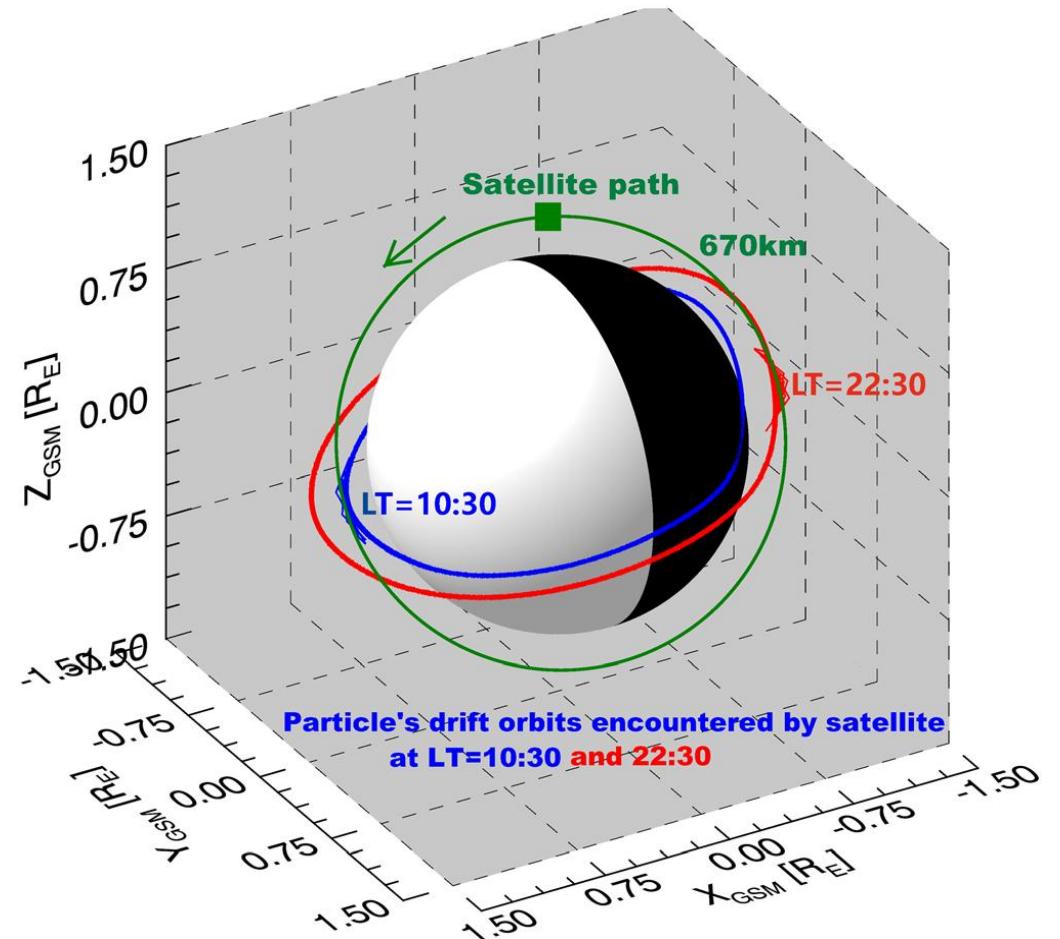
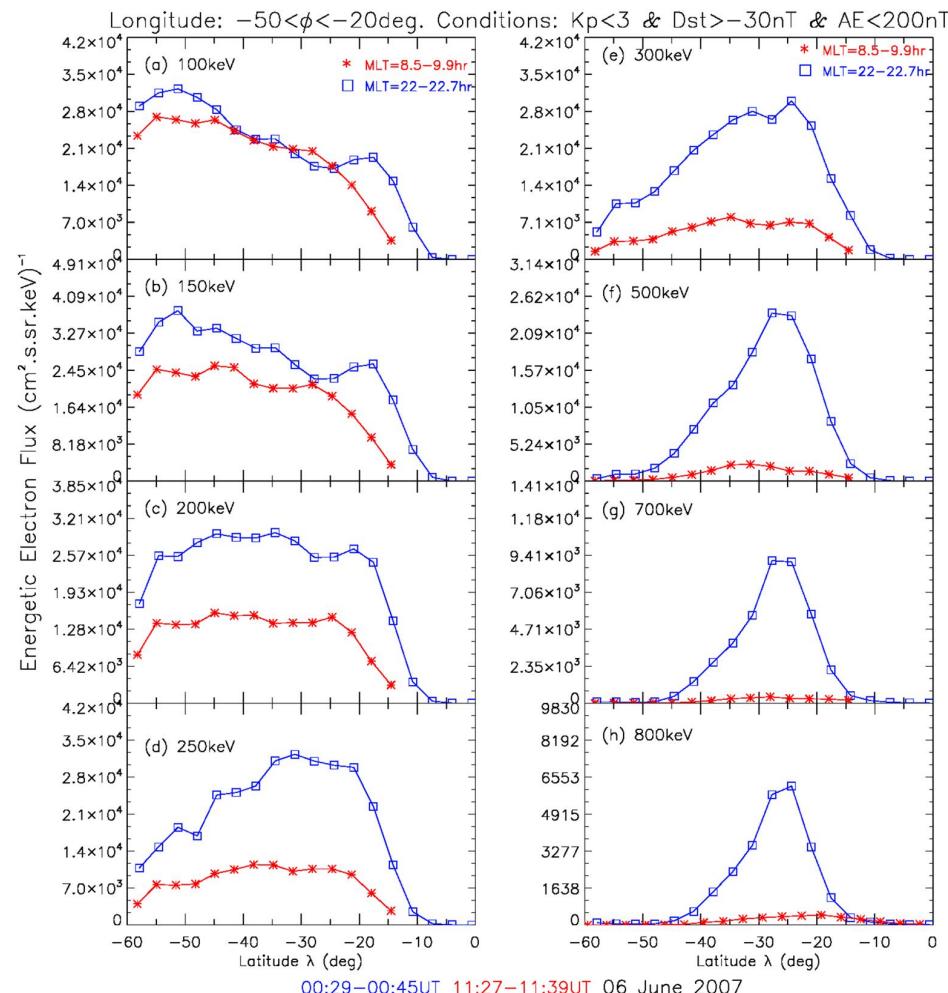


图1 Explorer-1 在不同经度上卫星观测到的粒子计数随高度的变化(a) 和随磁场强度(b) 的变化

七十三、探测数据对坐标系的依赖性

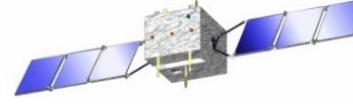


➤ 在相同高度上，由于昼侧地球磁场强于夜侧的。所以在相同高度但不同地方时上的高能带电粒子通量存在显著的昼夜差异



Li et al., 2020. SW

七十三、探测数据对坐标系的依赖性

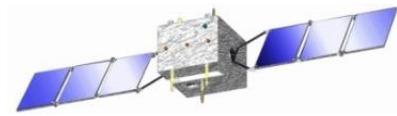


➤ $B-L$ 坐标系是使用磁场强度 B 和磁力线与磁赤道面交点的地心距 L （单位： R_E ）来定义的磁力线空间坐标系。在这种坐标系中， L 相同的磁力线形成一个围绕地球的磁壳，所以 L 又称作“磁壳参数”，它反映带电粒子在实际地磁场中漂移壳在赤道面上交点离地心的平均距离。 L 和 B 并不是正交的。在偶极场区域（约 $3 \sim 6R_E$ ）， L 和 B 可写为：

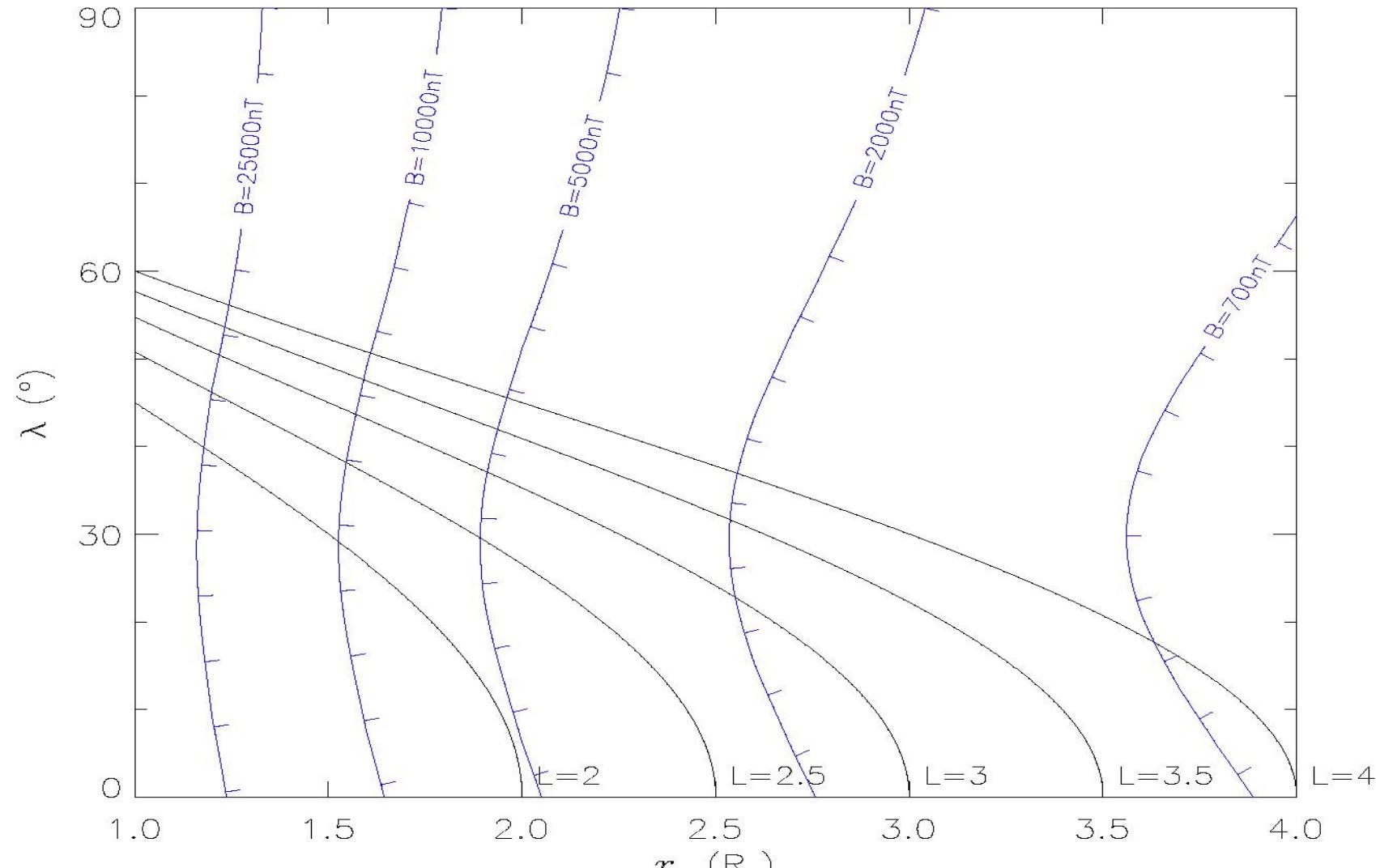
$$L = \frac{R}{\cos^2 \lambda}$$
$$B(\lambda) = \frac{B_0}{R^3} \left(4 - \frac{3R}{L} \right)^{1/2}$$

这里， λ 、 R 和 $B(\lambda)$ 分别是P点的地磁纬度、地心距离和磁场强度。 R 单位是 R_E 。如果知道磁力线跟磁赤道面（ $\lambda=0$ ）交点的地心距离 r_0 ，则 $L = r_0/R_E$ 。于是可获得磁力线和地球表面（ $R=1$ ）交点的地磁纬度（通常称为不变纬度 λ ）和 L 的关系为：

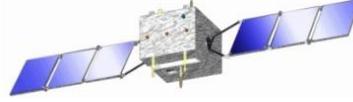
七十三、探测数据对坐标系的依赖性



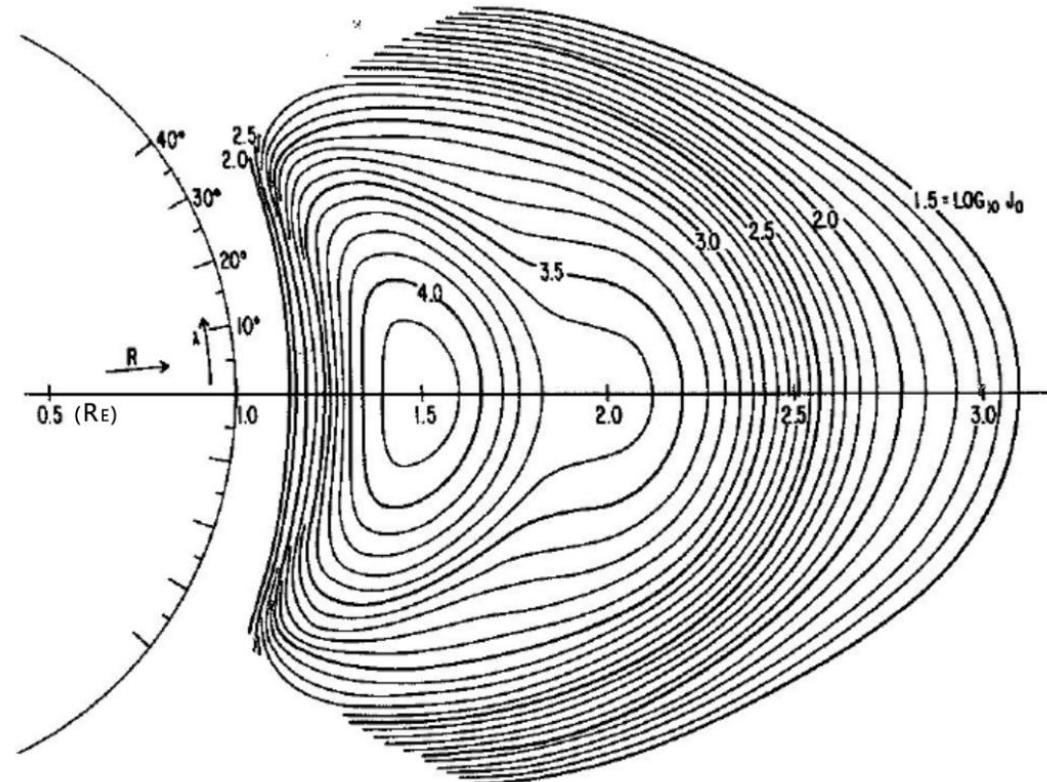
$$\cos^2 \Lambda = \frac{1}{L}$$



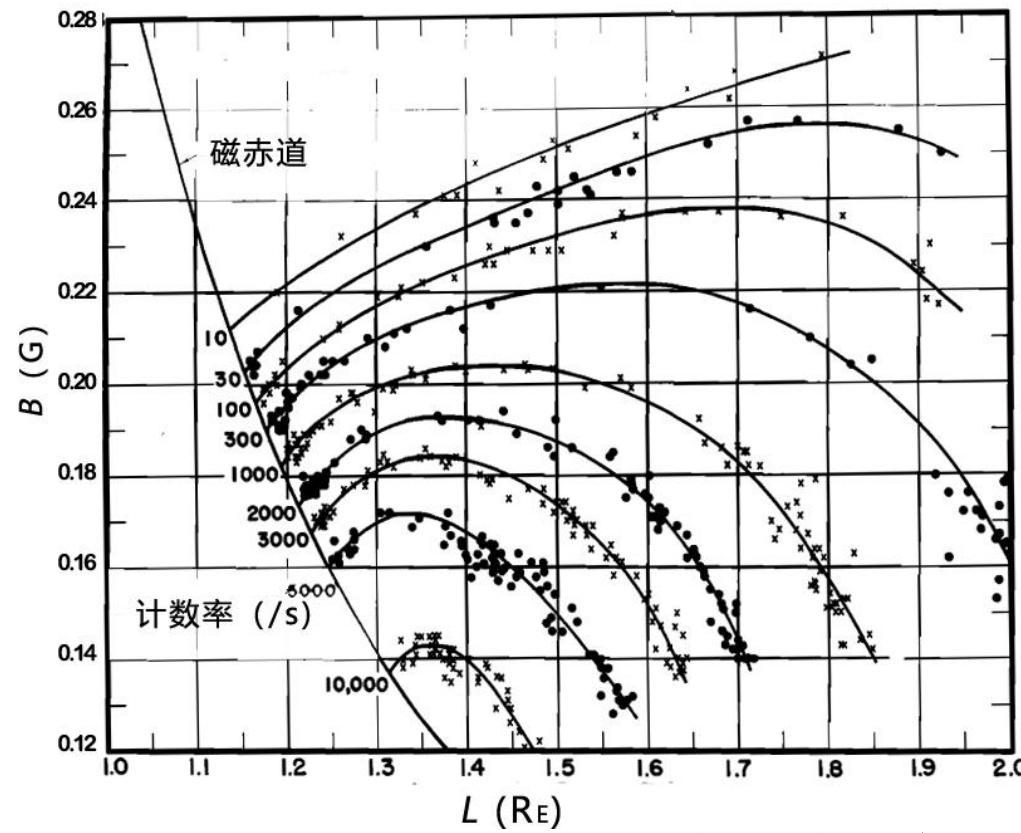
七十三、探测数据对坐标系的依赖性



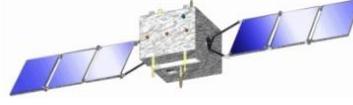
- $B-L$ 坐标系适合用来分析高能粒子全向通量的空间分布情况



在地理坐标系中，质子的通量呈现复杂的三维等值线分布。



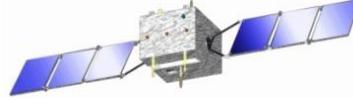
在 $B-L$ 坐标系中呈现二维曲线分布，能够直观地给出在不同高度（ L ）和不同磁场强度对应的高能质子的通量大小。



- 跟标量数据相比，空间探测的矢量场数据（电场、磁场、波矢量、等离子体的速度等）对空间坐标系的依赖性更强。

- 只有把测量数据放在合理的坐标系中，数据才能客观地反映出所测物理量的方向和大小。因此，想要准确地测量和分析空间矢量场的变化规律，需要在卫星整体设计阶段就得规划好，包括卫星总体架构、不同探测器探头的安装位置和方向、探头坐标系和卫星坐标系的关系等。

七十三、探测数据对坐标系的依赖性



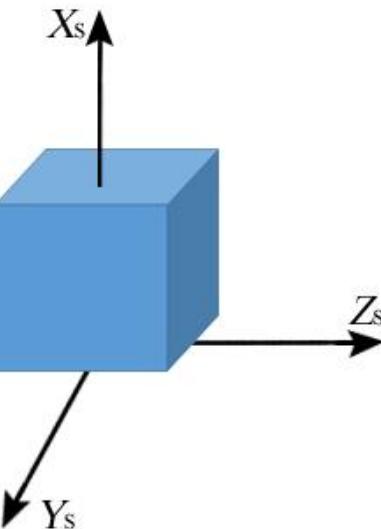
➤ 卫星坐标系：卫星是用来安装各种仪器的平台，卫星（构形）坐标系规定了各种观测仪器安装的空间位置。卫星坐标系三轴的定义依照卫星的主要惯性轴决定，不同卫星的坐标系可以不一样。

例如，DEMETER卫星坐标原点：星箭对接面几何中心；

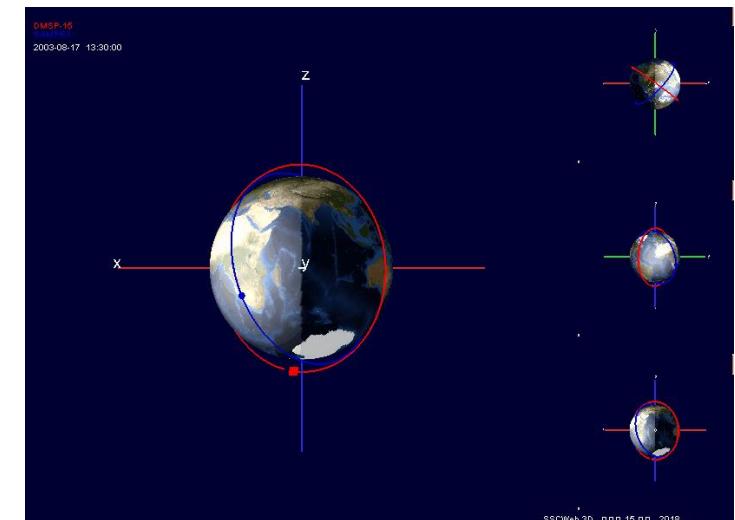
+ X_s 轴：过坐标原点，指向地心方向；

+ Z_s 轴：过坐标原点，指向卫星飞行方向或相反；

+ Y_s 轴：与 X 轴、 Z 轴成右手正交坐标系。

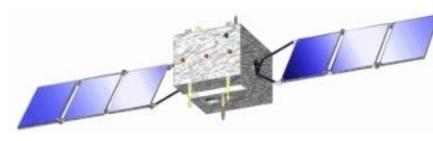


DEMETER卫星坐标系

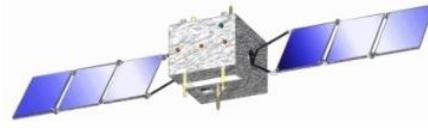


DEMETER卫星轨道

七十五、卫星坐标系



- 卫星坐标系取决于卫星平台的飞行姿态。LEO卫星通常采用三轴稳定的圆轨道飞行，而大椭圆转移轨道卫星采用自旋稳定的飞行姿态。
- 三轴稳定就是卫星不旋转，本体在X、Y、Z三个方向上均稳定，换言之就是与地球保持一定的姿态关系。优点是能适应绝大多数卫星应用，易于满足载荷的定向要求，轨控较易实现。明显缺点没有，但需要增加姿控系统（姿控推力器、动量轮等），对控制的要求也高些。三轴稳定卫星通常是极轨卫星。可以实现定向测量矢量场的要求。
- 自旋稳定就是利用陀螺定轴性，使卫星的自转轴自发保持稳定，但只有1个轴是稳定可控的。优点是实现简单，只需要火箭末级或星上起旋火箭工作即可起旋。缺点是星上质量必须对称分布，载荷受限，定向天线不易安排，姿控和轨控比较麻烦。自旋卫星方便测量带电粒子的全向通量等物理量。



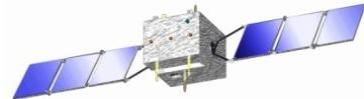
七十五、卫星坐标系

- 自旋稳定就是利用陀螺定轴性，使卫星的自转轴自发保持稳定，但只有1个轴是稳定可控的。优点是实现简单，只需要火箭末级或星上起旋火箭工作即可起旋。缺点是星上质量必须对称分布，载荷受限，定向天线不易安排，姿控和轨控比较麻烦。自旋卫星方便测量带电粒子的全向通量等物理量。

Credit: NASA



七十六、探头或传感器坐标系



- 探头/传感器坐标系是相对于卫星坐标系构建的。探头坐标系的定义依靠仪器的主轴决定。不同探测仪器的坐标系不同。该坐标系由卫星总体设计人员和仪器设计人员共同决定。
- 传感器的探测参数最终要转化到卫星坐标系中，然后再转化到地理或地磁坐标系中。不同坐标系之间的变换矩阵由工程设计人员给出，相关的变换矩阵参数作为辅助数据和科学仪器探测到的数据放在一起。

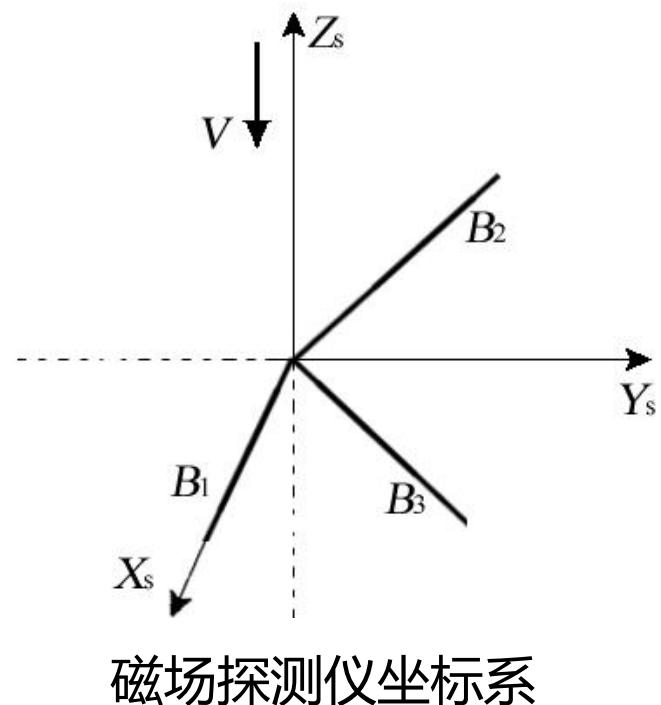
例如：DEMETER卫星磁场探测仪坐标系 (B_1 , B_2 , B_3) 与卫星坐标系 (X_s , Y_s , Z_s) 关系为：

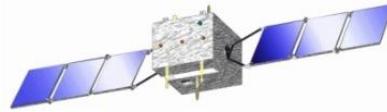
B_1 : 平行于 X_s

B_2 : 在 Y_sZ_s 平面内，与 Y_s 和 $+Z_s$ 成 45 度角

B_3 : 在 Y_sZ_s 平面内，与 Y_s 和 $-Z_s$ 成 45 度角

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0000 & 0.000 \\ 0.0000 & 0.7071 & 0.7071 \\ 0.0000 & 0.7071 & -0.7071 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{pmatrix}$$





七十六、探头或传感器坐标系

- 传感器的探测参数最终要转化到卫星坐标系中，然后再转化到地理或地磁坐标系中。不同坐标系之间的变换矩阵由工程设计人员给出，相关的变换矩阵参数作为辅助数据和科学仪器探测到的数据放在一起。
例如，DEMETER磁场探头在卫星坐标系中的位置为：

$$X = 1688.09 \text{ mm}$$

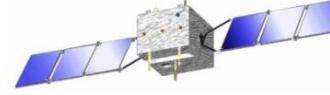
$$Y = 1753.69 \text{ mm}$$

$$Z = 132.0 \text{ mm}$$

根据几何关系，可以将探测矢量从探头坐标系中 $(B_1, B_2, B_3)_T$ 转换到卫星坐标系

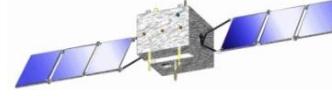
$$(B_x, B_y, B_z)_S \text{ 中：} \begin{bmatrix} 1.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.70711 & 0.70711 \\ 0.00000 & 0.70711 & -0.70711 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{pmatrix}_T = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}_S$$

七十七、正交坐标系变换方法



- 对于正交坐标系来说，只要知道两个坐标系之间的转化矩阵，就可以将测量的矢量从一个坐标系转化到另外一个坐标系中。其方法就是计算转化矩阵和旧坐标系中的矢量[单列矩阵]的行乘，所得到的矢量[单列矩阵]就是新坐标中的值。
- 最简单的坐标变换方法就是首先在旧坐标系a中找出新坐标系b的三个坐标轴的取向。若新X轴在旧体系中的余弦表示为 (x_1, x_2, x_3) （也就是新坐标轴在原坐标系中的单位矢量），Y轴为 (y_1, y_2, y_3) ，Z轴为 (z_1, z_2, z_3) ，那么矢量 $(B_x, B_y, B_z)_a$ 从旧坐标系a转换到新坐标系b中的计算公式为：

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}_a = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}_b$$



➤ 相反，矢量B从坐标系b转换到坐标系a中的计算公式为：

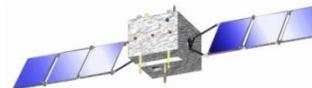
$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}_b = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}_a$$

- 两个矩阵的乘积可以用IDL数组列乘(#) ($c=a\#b$)， 要求数组a的列数等于b的行数， 乘积c具有a的列和b的行数。
- 两个矢量的点乘 ($c = a \cdot b = |a||b|\cos\theta$, θ 为a和b之间的夹角)就是把其中的一个矢量投影到另一个矢量方向上。例如，将波矢量 k 平行于背景磁场方向的分量为：

$$k_{||} = k \cdot B = |k||B|\cos\theta$$

- 两个矢量的叉乘($c = a \times b = |a||b|\sin\theta$,)获得的矢量c垂于两个矢量。例如,电磁波的坡印廷矢量为：

$$P = \delta E \times \delta B$$



七十八、地心赤道惯性坐标系 (GEI)

► 地心赤道惯性系 (GEI)

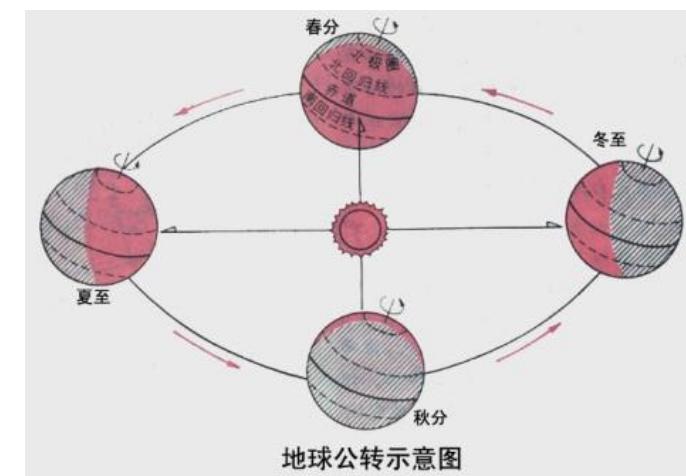
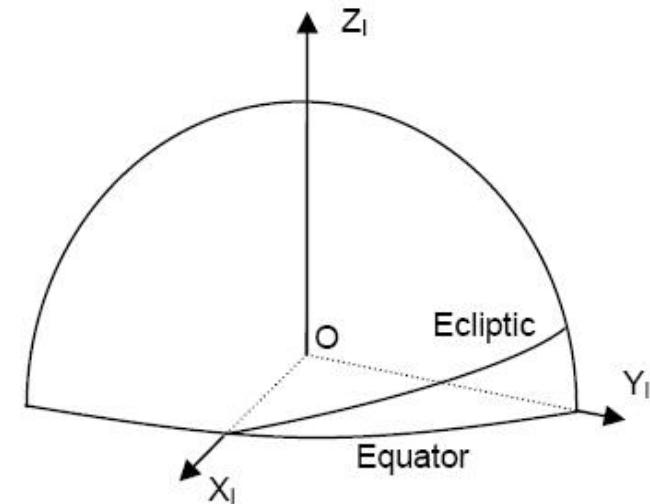
在计算天体和卫星的轨道时，通常会用到地心赤道惯性系(geocentric equatorial inertial system,GEI)。

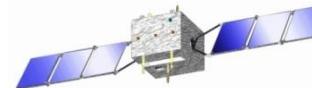
- GEI坐标系以地心为坐标原点，其 X_{GEI} 轴由地心指向春分点时太阳所处的位置，它是地球赤道面与黄道面的相交线，因此 X_{GEI} 轴同时处于这两个平面上。

- Z_{GEI} 轴与地球自转轴平行

- 其 Y_{GEI} 轴与 X_{GEI} 及 Z_{GEI} 轴构成右手正交系,即 $Y_{\text{GEI}} = Z_{\text{GEI}} \times$

X_{GEI}





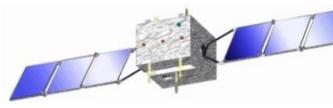
七十八、地心赤道惯性坐标系 (GEI)

- GEI之所以叫惯性系是因为坐标轴相对于遥远的恒星是“静止的”。无论是地球自转还是卫星在运动，此坐标轴都是“固定不动的”。不过时间久了，春分指的方向相对于恒星也会发生变化。四千年前，春分(X_{GEI} 轴)指向白羊座。现在的春分指向双鱼座。
- 如果知道在GEI系中测量的矢量 $(B_x, B_y, B_z)_{\text{GEI}}$ 和其大小 B ，则赤经度 (φ) 和赤纬度 (λ) 为：

$$\varphi = \tan^{-1}(B_y/B_x)$$

$$\lambda = \sin^{-1}(B_z/B)$$

当 $B_y \geq 0$ 时， $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ ；当 $B_y \leq 0$ 时， $-180^\circ \leq \varphi \leq 0^\circ$ ； $-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$ 。

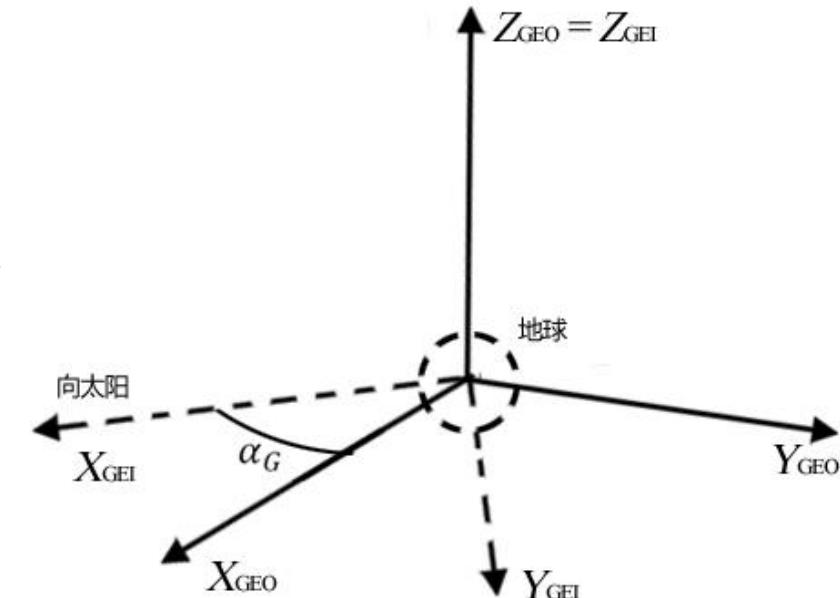


➤ 地理坐标系 (GEO)

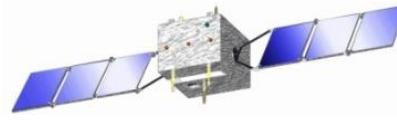
在确定卫星发射和接收位置等导航定位时，需要使用地理坐标系 (geographic coordinates, GEO) 。

- GEO坐标系的 X_{GEO} 轴在地球赤道平面上通过格林尼治子午圈 (0经度) 由地心指向外面
- Z_{GEO} 轴与 Z_{GEI} 相同，平行于地球自转轴
- $Y_{GEO} = Z_{GEO} \times X_{GEO}$

如果知道在GEO系中测量的矢量 $(B_x, B_y, B_z)_{GEO}$ 和大小 B ，则可以计算地理经度 (φ) 和地理纬度 (λ)



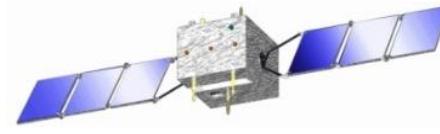
GEO坐标系



- 在分析和处理地基和空间探测数据时，除了将数据转换到地理坐标系中之外，还需要给出数据测量点所在的地方时，以便分析探测物理量（譬如地磁场强度、电离层等离子体密度等）的地方时变化。
- 观测者所在的地方时 (LT) 就等于当时的世界时 (UT) 加上观测者所在地理经度的时间间隔（1小时对应的地理经度为 $360/24=15$ 度），即：

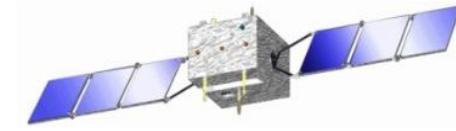
$$LT = UT + \frac{\varphi}{15^o}$$

例如，北京大约位于东经 120° 的经度位置上，则北京的地方时 $LT = UT + 120/15 = UT + 8$ 。



- 由于GEO和GEI坐标系的Z轴是共同的，所以只知道白羊座 (Aries) 中的第一个点相对于格林尼治子午线的位置便可确定所需的变换。设格林尼治子午线与地球赤道上由Aries的第一点向东测量的第一点之间的夹角为 α_G ，则Aries的第一点在GEO系中的位置为 $(\cos \alpha_G, -\sin \alpha_G, 0)$ 。这样就可以将GEO中测量的矢量 $(B_x, B_y, B_z)_{\text{GEO}}$ 转换到GEI中 $(B_x, B_y, B_z)_{\text{GEI}}$ ，其坐标变换公式为：

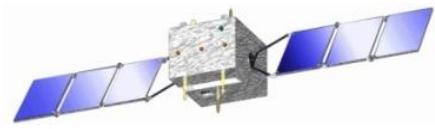
$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_G & -\sin \alpha_G & 0 \\ \sin \alpha_G & \cos \alpha_G & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}_{\text{GEO}} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}_{\text{GEI}}$$



- 其逆变换为：

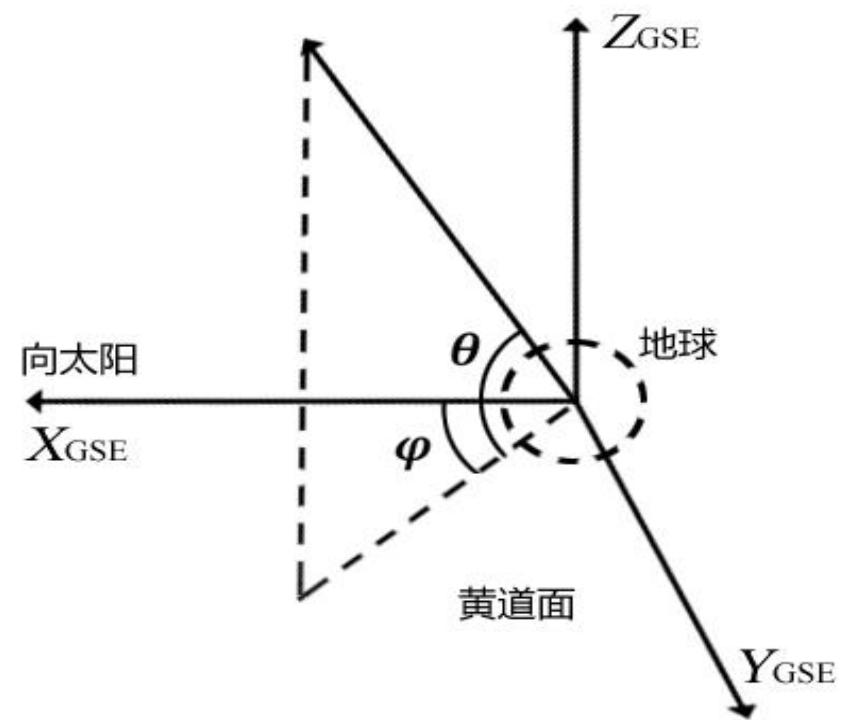
$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_G & \sin \alpha_G & 0 \\ -\sin \alpha_G & \cos \alpha_G & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}_{\text{GEI}} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}_{\text{GEO}}$$

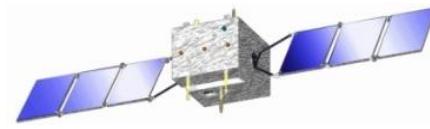
- 角度 α_G 是以天和年为单位的时间函数，因为惯性空间中地球每年自转366.25周，大于365.25周。因此，相对于惯性空间来说（恒星日），一天不到24小时。 α_G 角被称为格林尼治恒星平均时。



八十、地心太阳黄道坐标系 (GSE)

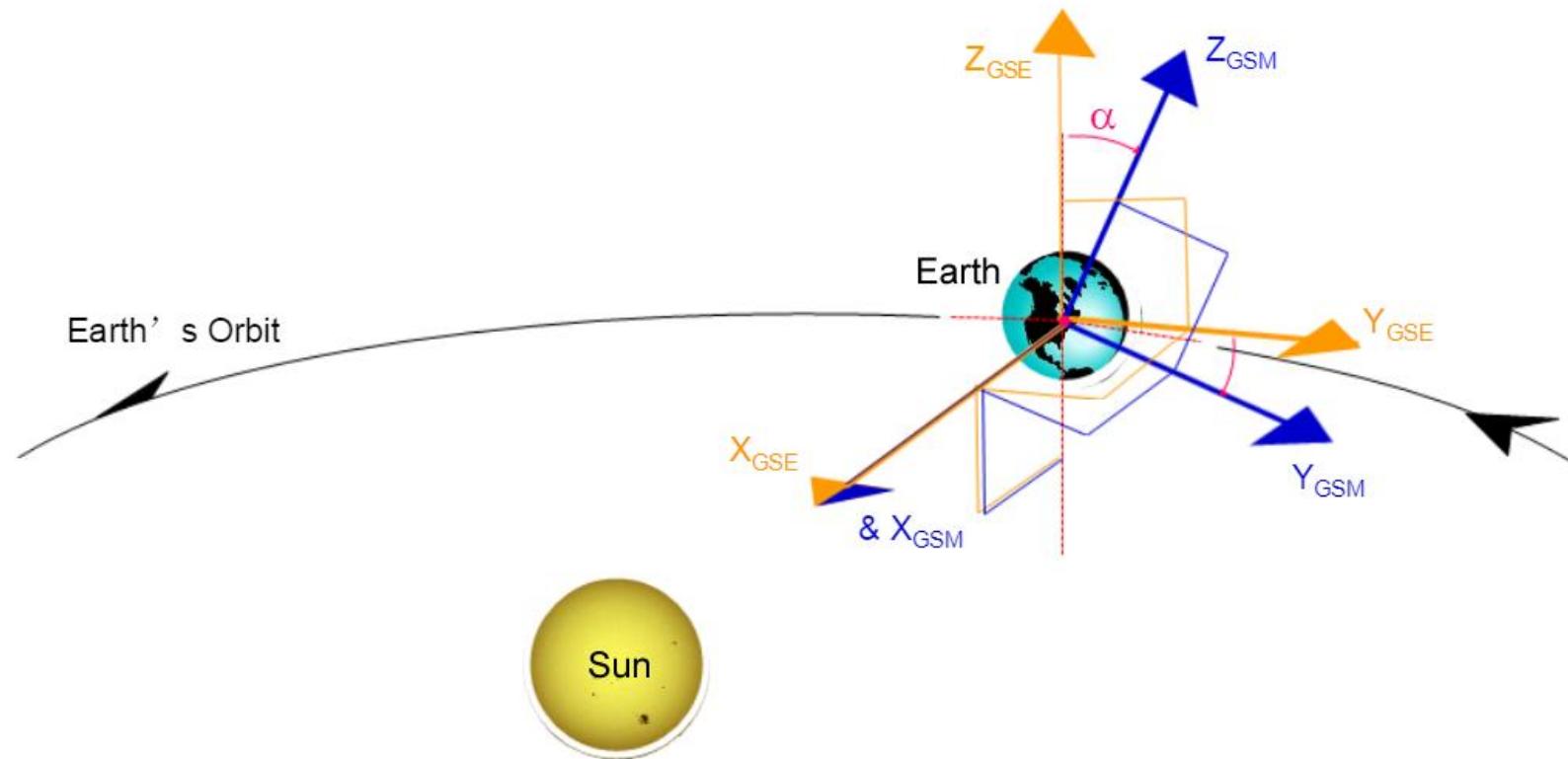
- 在测量行星际磁场和太阳风等离子体流速时，通常把数据放在地心太阳黄道坐标系 (geocentric solar ecliptic system, GSE) 中。
 - 。 GSE坐标系以地心为原点。
- X_{GSE} 轴由地心指向太阳
- Y_{GSE} 轴在黄道平面上并指向昏侧（与行星运动方向相反）
- Z_{GSE} 轴与黄道极平行。



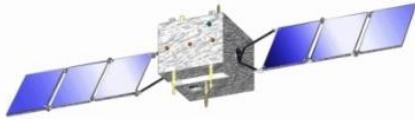


八十、地心太阳黄道坐标系 (GSE)

- GSE坐标系随着地球围绕太阳公转，其公转周期为一年。这与GEI惯性坐标系不同。
- GSE坐标系的公转可以消除由于地球公转运动而产生的光行差效应。

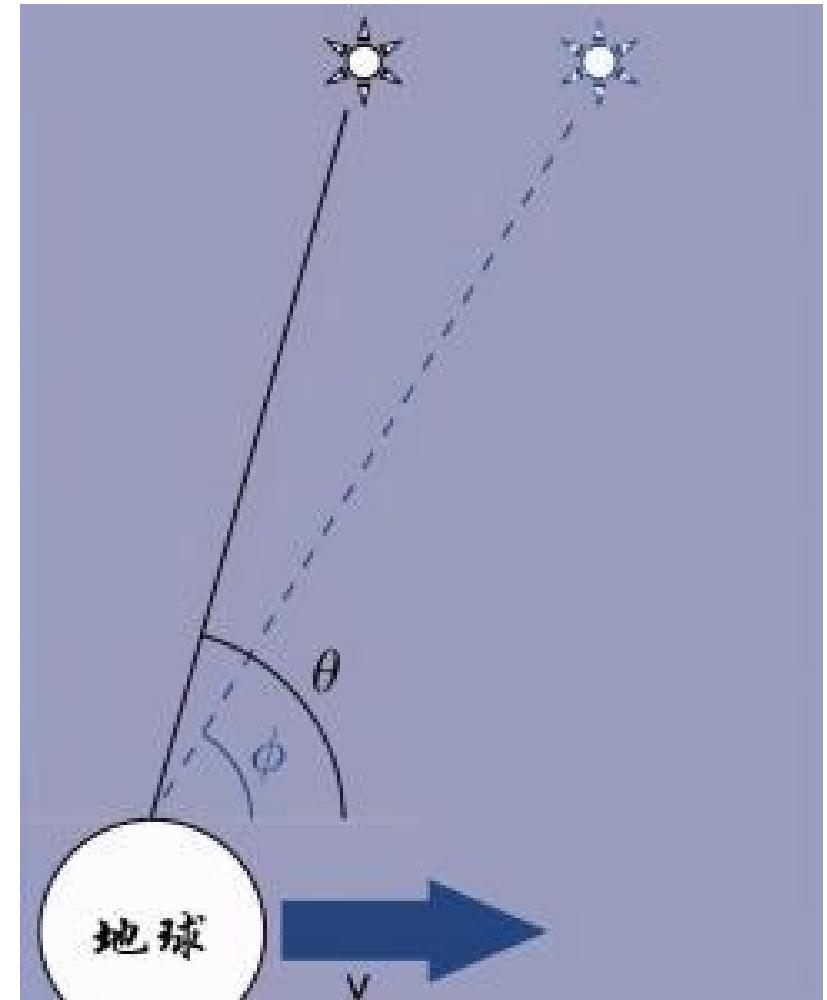


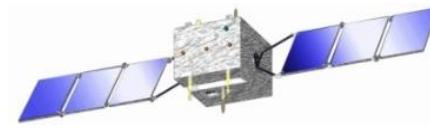
光行差



- 光行差（或称为天文光行差、恒星光行差）：
是指运动的观测者观察到光的方向与同一时间同一地点静止的观测者观察到的方向有偏差的现象。光行差本质是由于光速有限以及光源与观察者存在相对运动造成的。光行差现象在天文观测上表现得尤为明显。
。运动速度较快的还得考虑相对论效应带来的修正。

例如，由于地球公转、自转等原因，地球上观察天体的位置时总是存在光行差，其大小与观测者的速度和天体方向与观测者运动方向之间的夹角有关，并且在不断变化。





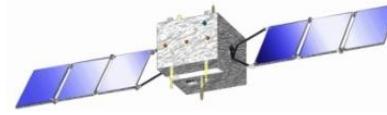
- GSE系中 Z_{GSE} 轴（黄道极点）的位置在GEI系中是常数 $(0, -0.398, 0.917)$ 。其 X_{GSE} 轴在GEI系指向太阳的方向 (S_1, S_2, S_3) ，可以通过《太空物理学导论》书中A.3.5节给出的子程序算出。其 Y_{SE} 轴在GEI系中的方向 (Y_1, Y_2, Y_3) 为：

$$(0, -0.3978, 0.9175) \times (S_1, S_2, S_3)$$

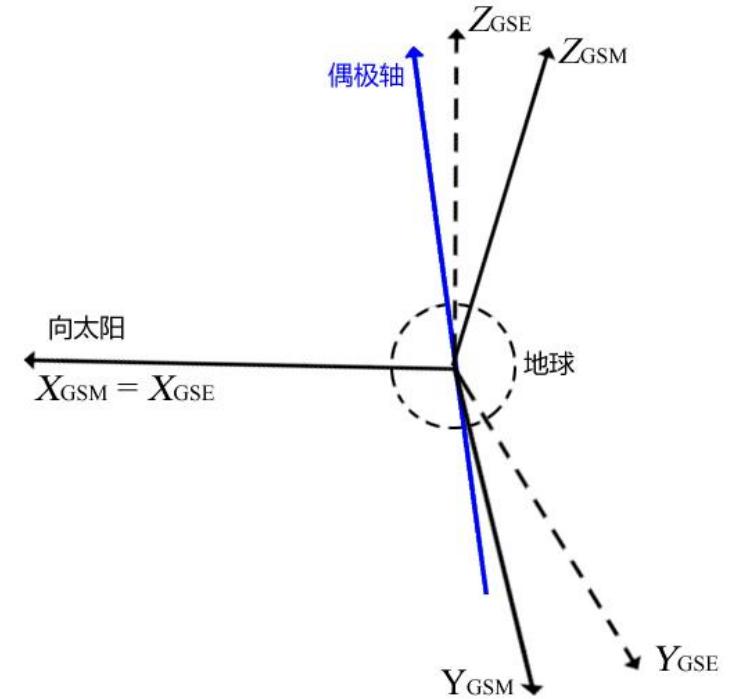
只要得到GSE坐标轴在GEI中的单位方向，便可把GEI系中测量的矢量转换到GSE系中：

$$\begin{pmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ 0 & -0.3978 & 0.9175 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}_{\text{GEI}} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}_{\text{GSE}}$$

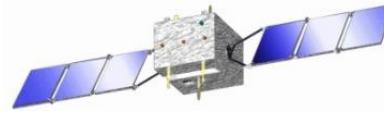
- GSE坐标系虽然可以很好地反映出太阳风速度和行星际磁场方向等矢量特征，但是它并没有考虑地磁轴绕地理轴的每日旋转，也没有考虑地磁场位形的周日变化。因此，它并不适合用于分析地球磁层中的一些矢量场相对于地球磁场的分布或变化。



- 分析太阳风与地球磁层相互作用或者研究地球外磁层 ($> 6R_E$) 、磁层顶和磁鞘中的矢量场时，通常把卫星探测数据转化到地心太阳磁层坐标系 (Geocentric Solar Magnetospheric System, GSM) 中。
- 该坐标系的 X_{GSM} 轴与 GSE 系的 X_{GSE} 轴相同，也是由地心指向太阳的。
- GSM 的 Y_{GSM} 轴与地磁偶极轴垂直，且垂直于日地线的。因此, Y_{GSM} 轴在晨昏子午线上并指向黄昏侧。
- Z_{GSM} 轴在 X_{GSM} 轴与偶极轴决定的平面内 (即共面) , 取向与磁北极相同但并不重合，一天围绕地球自转轴一周。



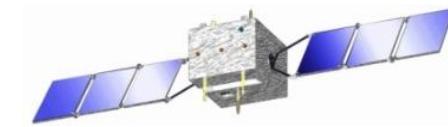
GSM坐标系



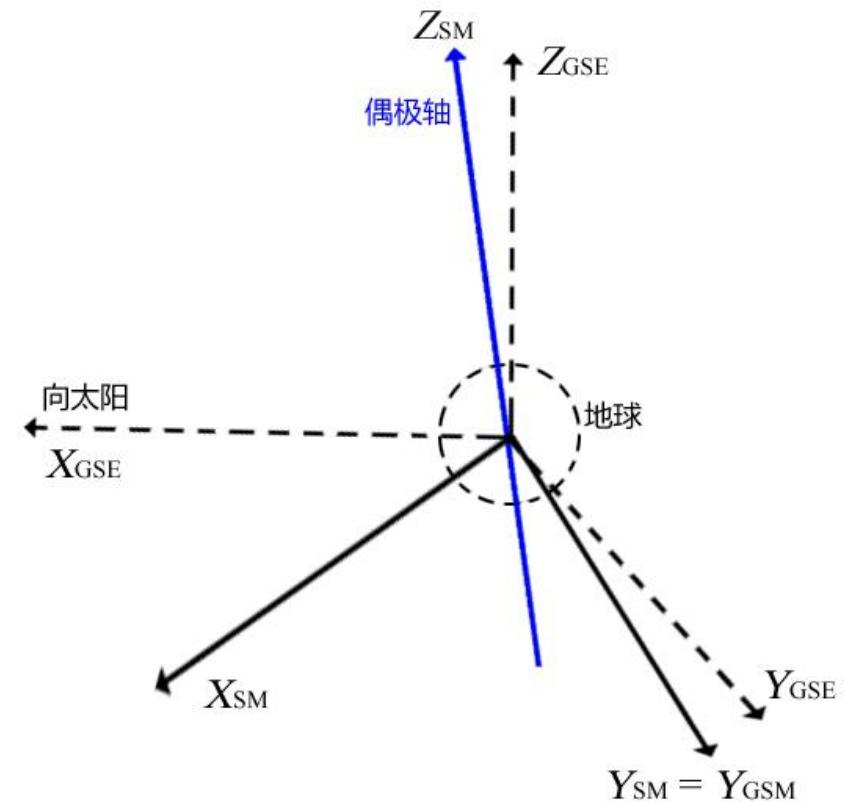
- GSM坐标系也常常用来研究行星际磁场相对于地球磁层的锥角和时钟角，其锥角是行星际磁场与XGSM轴的夹角，也叫太阳天顶角(SZA)或极化角，其时钟角就是行星际磁场在YGSM-ZGSM平面上的投影角，也称方位角，其测量是从正YGSM轴指向正ZGSM轴。
- 由于GSM和GSE坐标系的X轴是指向太阳固定不变的，所以这两个坐标系都有一年的公转周期。如果知道这两个坐标系Z轴或Y轴之间的夹角 α ，便可将GSE坐标系中的一个探测矢量 $(B_x, B_y, B_z)_{\text{GSE}}$ 转换到GSM坐标系中。 α 角每天的变化范围为 $\pm 11^\circ$ ，每年的变化范围为 $\pm 23.5^\circ$ 。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}_{\text{GSE}} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}_{\text{GSM}}$$

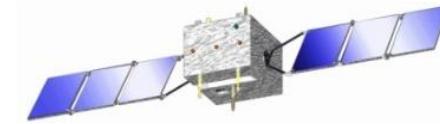
八十二、太阳磁坐标系 (SM)



- 在分析和处理那些受地球偶极场影响大于太阳风影响的磁层矢量场时，可以使用太阳磁坐标系 (Solar Magnetic Coordinates, SM) 。
- SM坐标系中的 Z_{SM} 轴与偶极轴平行； Y_{SM} 轴与 Y_{GSM} 轴相同； $X_{SM} = Y_{SM} \times Z_{SM}$ ， X_{SM} 轴在日地连线和偶极轴决定的平面内，但并不指向太阳

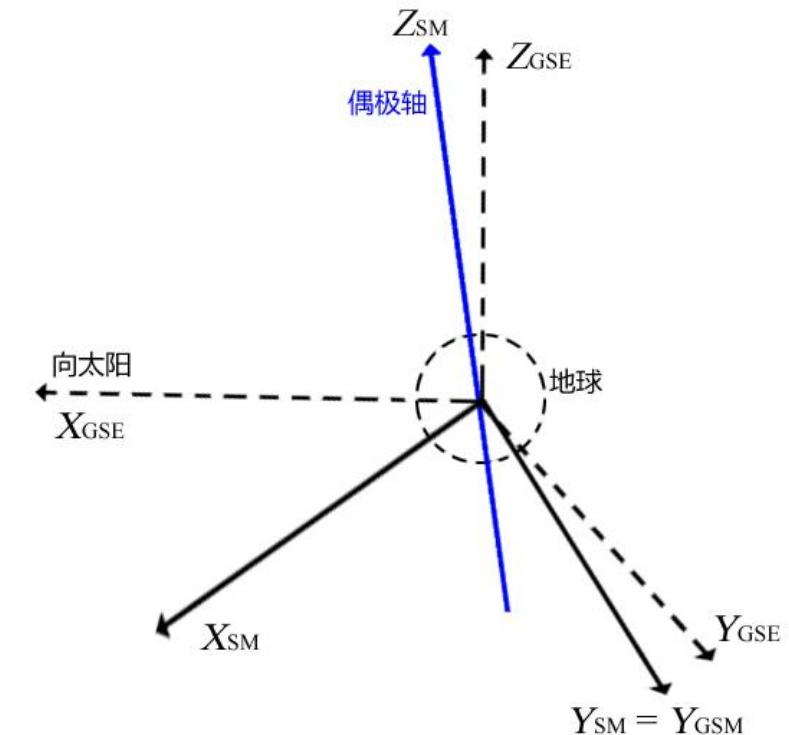


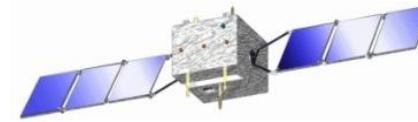
八十二、太阳磁坐标系 (SM)



- SM坐标系的 X_{SM} 和 Z_{SM} 轴围绕着GSM系的 Y_{GSM}
 $(= Y_{\text{SM}})$ 旋转了一个角度，其旋转角度等于偶极倾角 μ 。与GSM系一样，SM系每天随地球自转一周，每年围绕太阳旋转一周。
- 将一个矢量从GSM坐标系变换到SM坐标系的公式为：

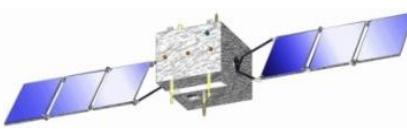
$$\begin{pmatrix} \cos \mu & 0 & -\sin \mu \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \mu & 0 & \cos \mu \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}_{\text{GSM}} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}_{\text{SM}}$$



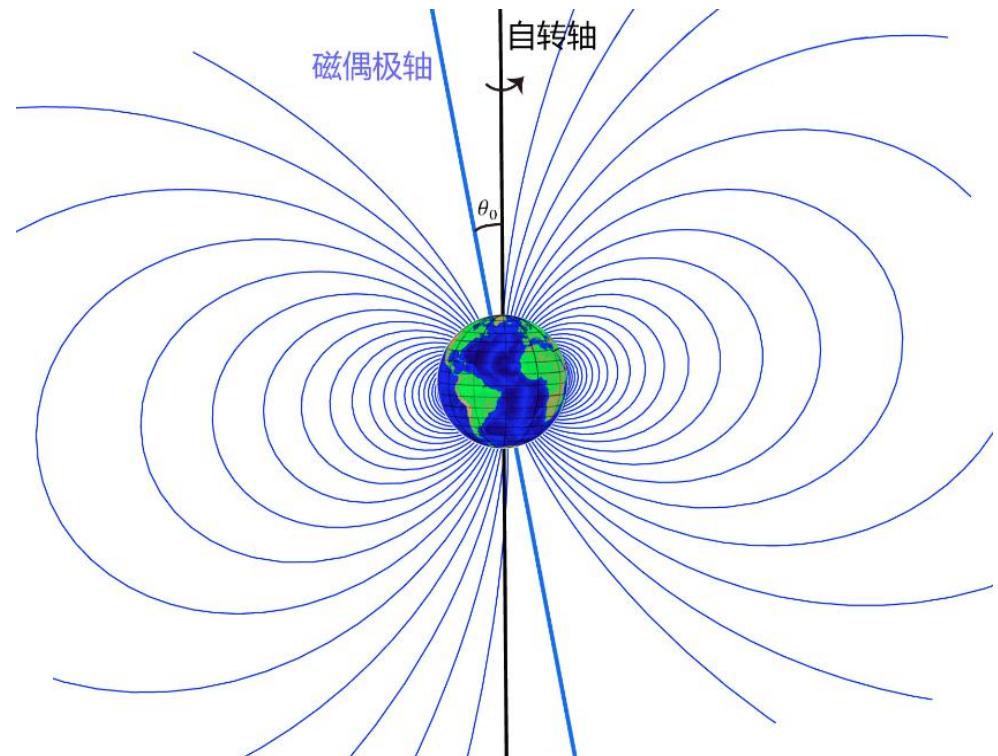


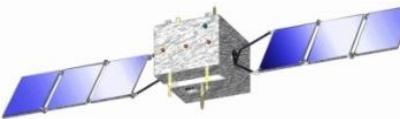
- 地磁坐标系 (Geomagnetic Coordinates, MAG) 坐标系的 Z_{MAG} 轴与磁偶极轴平行，在地理坐标中的位置为(0.06252,-0.18060,0.98157)
- Y_{MAG} 轴垂直于地极，若 N_m 是磁偶极位置， S 是南极点，则 $Y_{\text{MAG}} = N_m \times S / |N_m \times S|$
- X_{MAG} 坐标由 $Y_{\text{MAG}} \times Z_{\text{MAG}}$ 决定。
- MAG坐标系就是SM坐标系的 X_{SM} 和 Y_{SM} 轴围绕着 Z_{SM} 轴 ($= Z_{\text{MAG}}$) 旋转了一个角度
MAG坐标系又称地心倾斜偶极坐标系或地磁偶极坐标系。地磁偶极轴与地球自转轴并不重合。磁偶极轴与自转轴之间的夹角(θ_0)在不同年份地略有变化。从1985年国际地磁参考地磁场(IGRF)知，磁偶极轴的地理坐标为：余纬 $\theta_0 = 11.018^\circ$ ，东经 $\varphi_0 = -70.905^\circ \sim 70.905^\circ$ 。

八十三、地磁坐标系 (MAG)



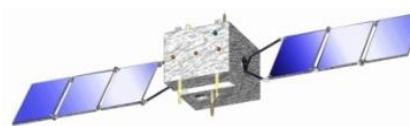
- 在大约 $3 \sim 6R_E$ 之间的地球磁场是昼夜对称的，可以当作偶极磁场，该区域内的矢量数据需要放在MAG坐标系中分析。
- 在小于 $3R_E$ 或大于 $6R_E$ 范围内的磁力线并不是昼夜对称的，偏离了偶极场形状，需要使用其他坐标系。
- 大于 $6R_E$ 范围内的矢量通常使用GSM坐标系。





八十三、地磁坐标系 (MAG)

- 若已知在MAG体系中的矢量 $(B_x, B_y, B_z)_{MAG}$ ，其大小为 B ，也可以计算得到地磁经度 (φ) 和地磁纬度 (λ) 。
- 零度地磁经线为连接地磁北极、地理南极和地磁南极的大半圆。地磁经度向东为正，地理北极位于 180° 的地磁经线上
- 从地磁赤道到地磁北极的地磁纬度为正值，从地磁赤道到地磁**南极**的地磁纬度为负值



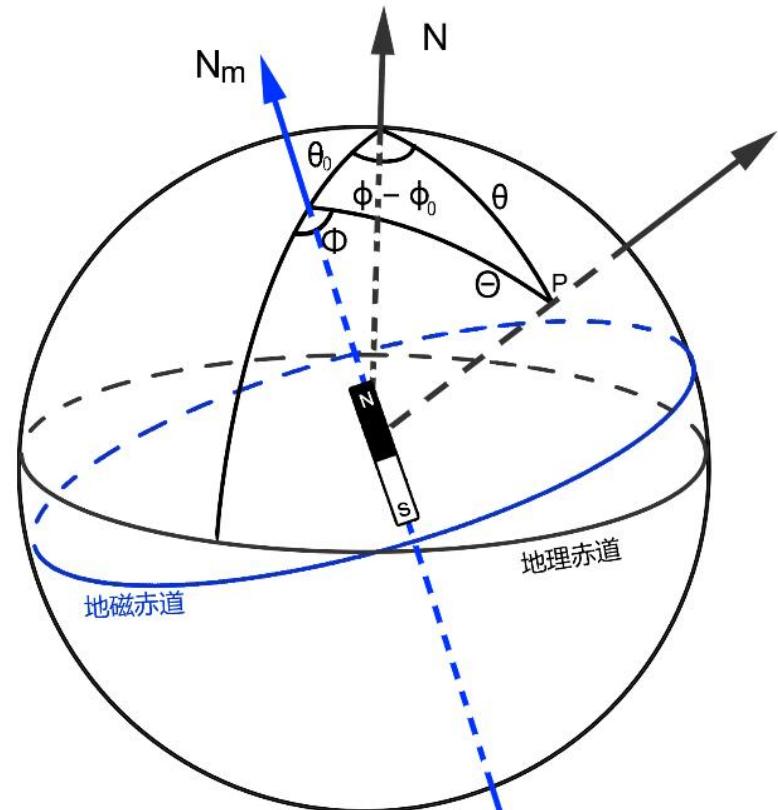
八十三、地磁坐标系 (MAG)

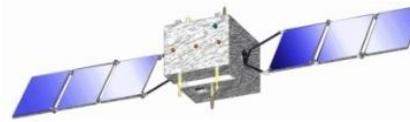
- 如果已知P的地理余纬 (θ) 和地理经度 (φ) , 则它的地磁余纬 (Θ) 和地磁经度 (Φ) 为:

$$\left. \begin{array}{l} \cos \theta = -\cos \theta_0 \cos \theta_0 - \sin \theta_0 \sin \theta_0 \cos(\varphi - \varphi_0) \\ \sin \Phi = \sin \theta_0 \sin(\varphi - \varphi_0) / \sin \theta_0 \end{array} \right\}$$

- 从地磁坐标位置换算出地理坐标位置:

$$\left. \begin{array}{l} \cos \theta = -\cos \theta_0 \cos \theta_0 - \sin \theta_0 \sin \theta_0 \cos \Phi \\ \sin(\varphi - \varphi_0) = \sin \theta_0 \sin \Phi / \sin \theta_0 \end{array} \right\}$$





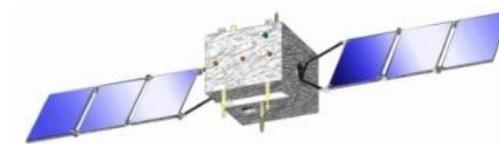
八十三、地磁坐标系 (MAG)

- 在研究高纬度磁场扰动和极光活动时，需要考虑太阳相对于地磁场的方向。如果知道太阳所处的地磁经度 Φ_s ,则观测点 (θ, ϕ) 所在的磁地方时 (MLT) 为：

$$MLT = \frac{\Phi_s - \Phi}{15^\circ}$$

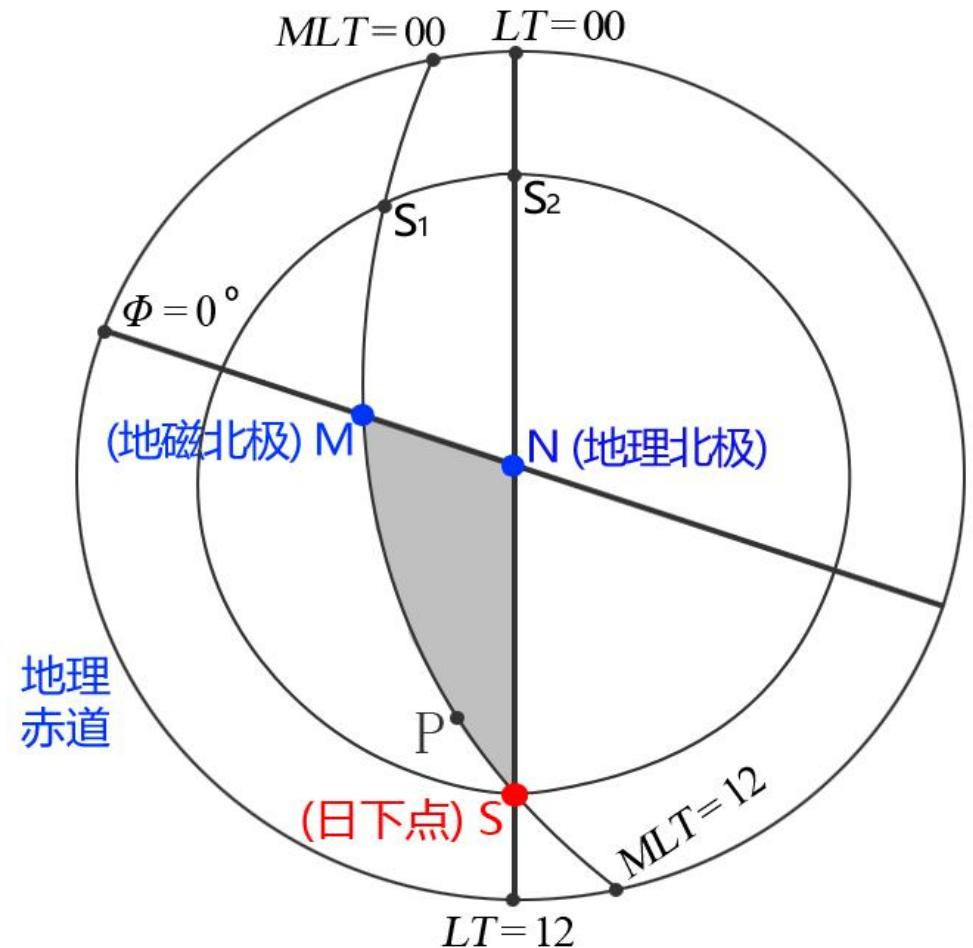
- 由于地磁偶极子轴与地球自转轴并不重合,所以磁地方时 (MLT) 并不等于地理地方时 (LT) 。纬度越高，磁地方时与地理地方时的差别越大。MLT与LT的换算公式为：

$$\sin(MLT - \Phi) = \frac{-\cos \delta \sin(\varphi - \varphi_0 - LT)}{\sqrt{1 - [\cos \theta_0 \sin \delta - \sin \theta_0 \cos \delta \cos(\varphi - \varphi_0 - LT)]^2}}$$

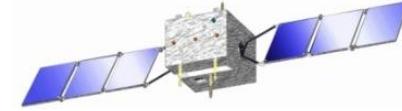


➤ 地理地方时随地理经度的变化是均匀的，而磁地方时随地磁经度的变化是不均匀的。

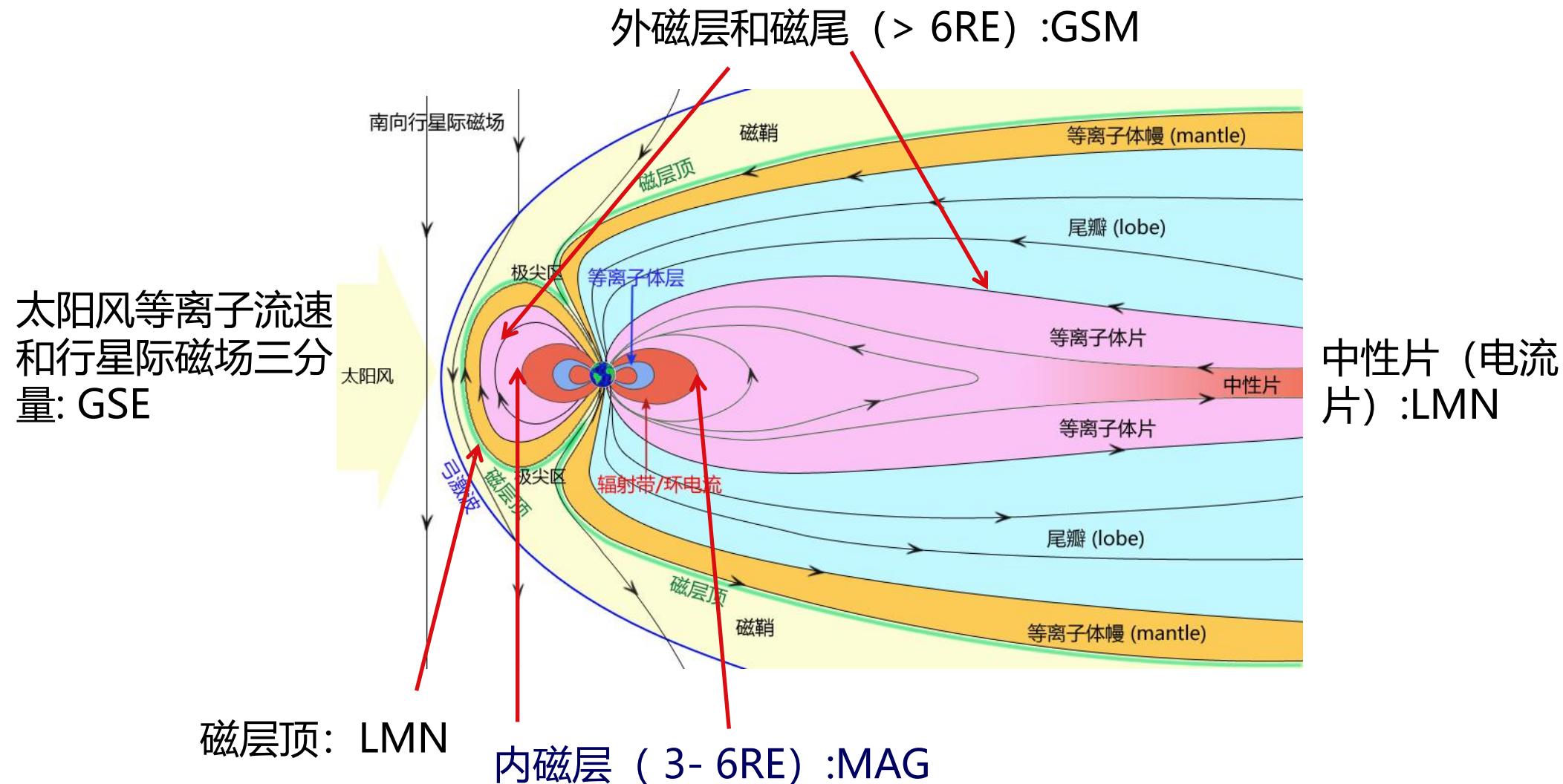
例如，太阳从地磁正午 S 点移动到地理子夜 S_2 点的时间与从 S_2 点移动到 S 点的时间间隔是相同的，都需要 12 小时。纬度越高，磁地方时 (MLT) 与地理地方时 (LT) 的差别越大。

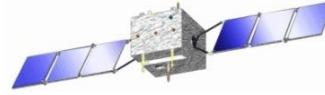


八十四、不同坐标系的适用范围



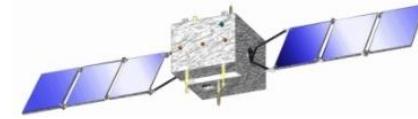
➤ GSE、GSM、SM和MAG都是以地心为坐标原点的坐标系，它们适用的空间范围较广。





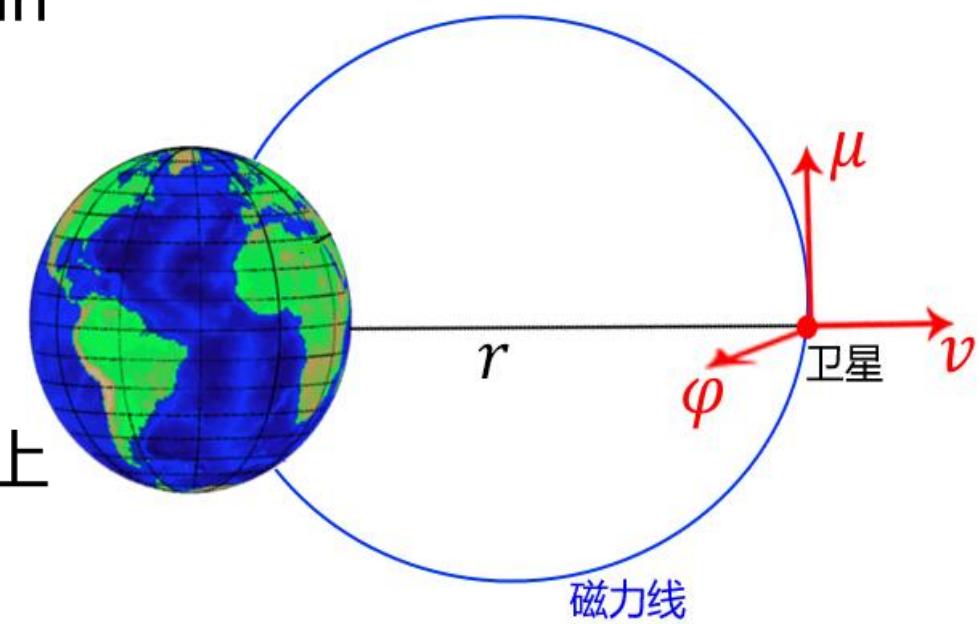
八十五、局地坐标系

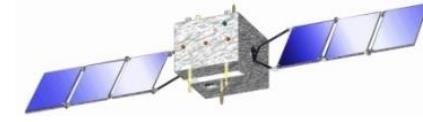
- 在分析当地等离子体波的扰动、传播方向、电磁场间断面或过渡区时，需要使用一些局地坐标系。常用的局地坐标系有：
 - 平均场向坐标系(MFA)
 - 边界法线坐标系 (LMN)
 - 地磁场观测点坐标系(HDZ)
- 局地坐标系的坐标原点并不是地心，它是随着空间变化的。



➤ 平均场向坐标系(MFA)

- 在分析电磁波的扰动性质和传播方向时，通常将波磁场或波电场三分量转换到平均场向坐标系（Mean field aligned (MFA) coordinates）中。
- μ 沿着背景磁场 B_0 的方向（当地磁力线的切线方向）
- φ 是方位方向， $v = \mu \times \varphi$ 。
- v 始终垂直于当地的磁场方向（ μ ），在磁赤道面上， v 沿径向（ r ）向外。
- MFA坐标系是随着局地磁场矢量 B_0 方向的改变而变化的。



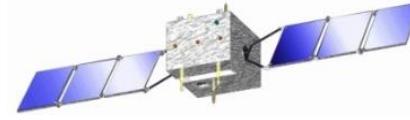


➤ 场向坐标系的确定方法：

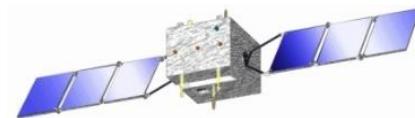
- 确定MFA坐标系需要知道卫星实测的磁场三分量、卫星的位置等参数。
- 通过对卫星实测的磁场三分量做短时间尺度的滑动平均获得背景磁场的方向 μ ；
- 方位方向 φ 垂直磁场矢量和卫星的位置矢量，并指向昏侧
- 径向方向 $v = \mu \times \varphi$

例如：由于内磁层区域磁场近似是偶极场，GOES 卫星在赤道面上测量的磁场北向分量 B_P ,可以近似作为场向分量(B_μ)，地向分量 B_R 近似为 B_v ，东向分量 $-B_E$ 近似为方位分量 B_φ

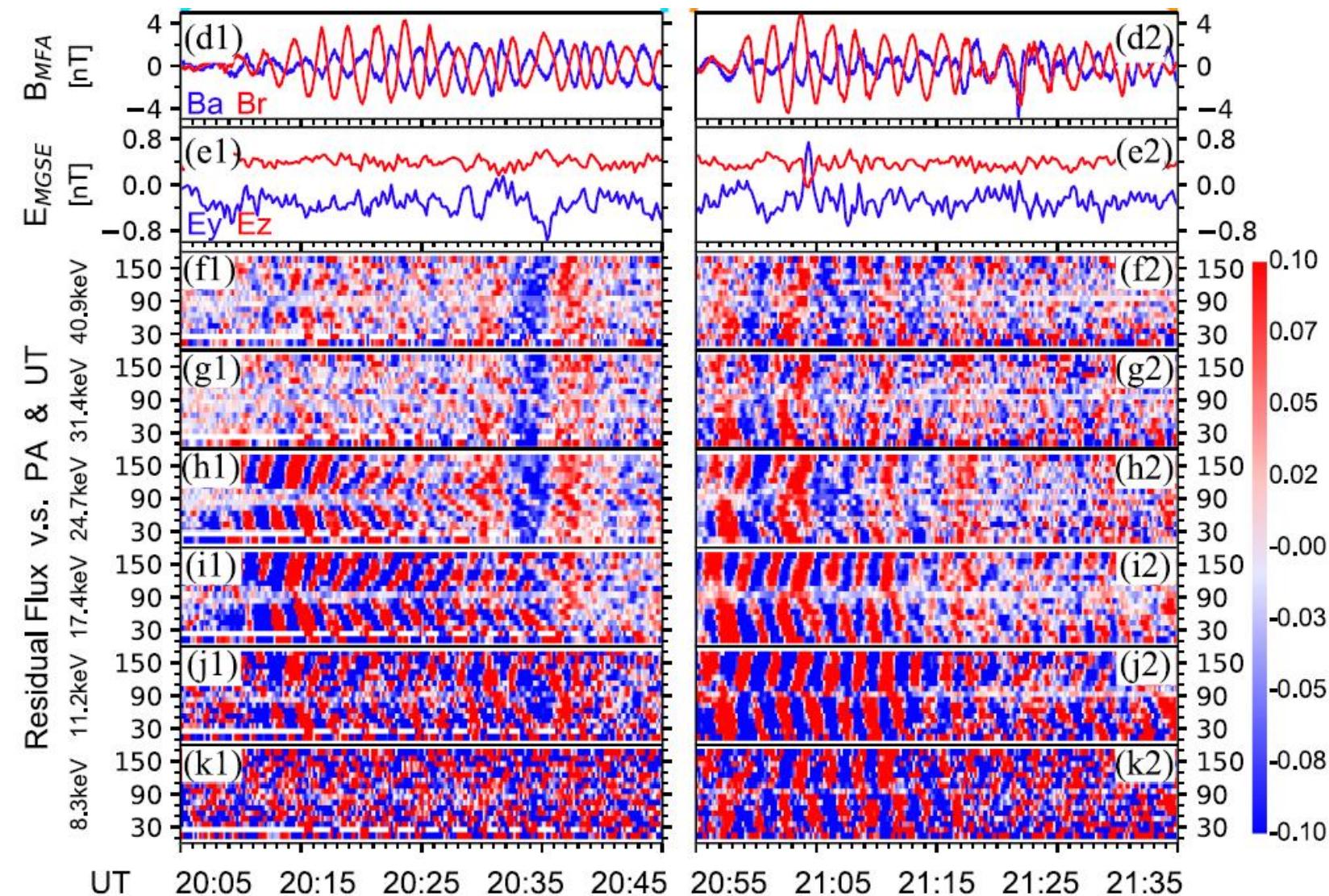
八十五、局地坐标系：MFA

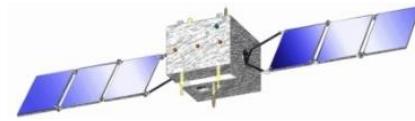


- 一旦确定了场向坐标系：通过对波磁场三分量的带通滤波获得波磁场三分量。通常称平行磁场方向的扰动为压缩分量，其他两个分别为径向和方位分量。
- MFA坐标系可用于ULF波分类：
 - ① 波磁场主要在平行磁场方向扰动（即压缩分量）的叫压缩波或磁声波
 - ② 波磁场主要在方位方向扰动的叫环向模 (Toroidal mode) ULF波
 - ③ 波磁场主要在径向方向扰动的叫极向模(Poloidal mode) ULF波



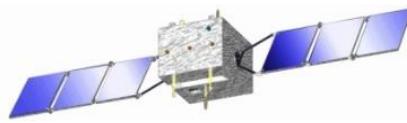
八十五、局地坐标系：MFA





八十五、局地坐标系：MFA

- MFA坐标系常常用来分析电磁波的极化性：
 - ✓ 极化 (polarization) , 泛指事物在一定条件下发生两极分化，使其性质相对于原来状态有所偏离的现象，譬如电极极化等。
 - ✓ 偏振就是横波的振动矢量（垂直于波的传播方向）偏于某些方向的现象。电磁波的偏振也称作极化，在光学里通常叫做光的偏振
 - ✓ 纵波只沿着与波一致的方向振动，则没有偏振。



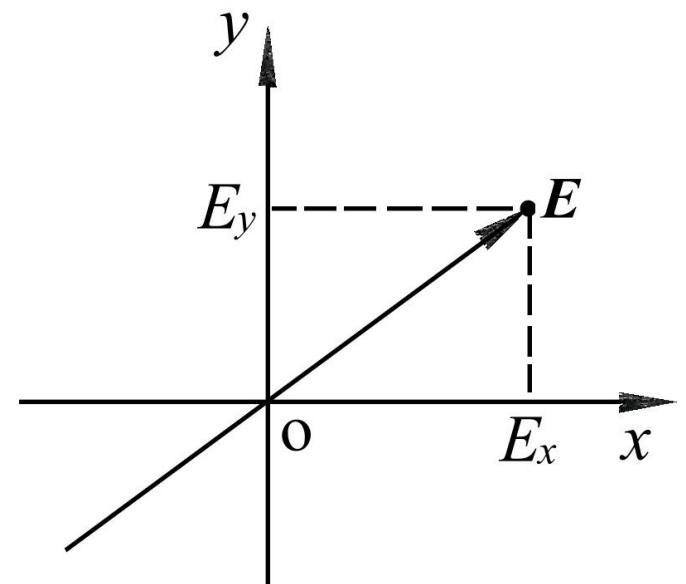
八十五、局地坐标系：MFA

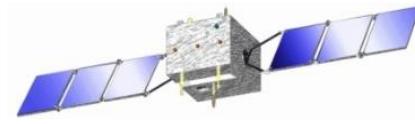
- MFA坐标系常常用来分析电磁波的极化性：
 - ✓ 波的偏振是波电场或波磁场矢量端点在一个周期内的运动轨迹

(1) 线偏振/极化

在直角坐标系中，如波沿正 z 轴向内传播， E 的端点在一个周期内的轨迹是一直线，即为线偏振或线性极化。

$$E_y / E_x = \text{常量}$$





(2) 椭圆偏振

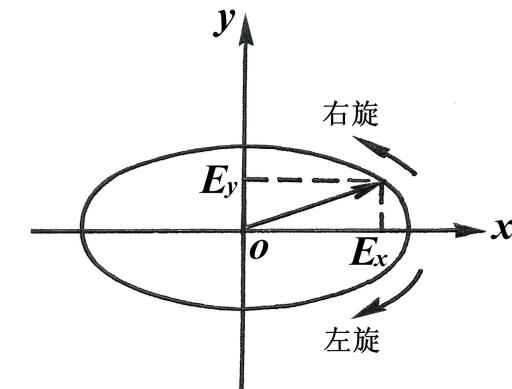
如果沿z轴向内传播的波为 $E(r, t) = (E_{xo} \mathbf{e}_x \pm i E_{yo} \mathbf{e}_y) \exp[i(kz - \omega t)]$

取实部

$$\begin{cases} E_x = E_{xo} \cos(kz - \omega t) \\ E_y = \mp E_{yo} \sin(kz - \omega t) \end{cases}$$

波矢量端点轨迹方程

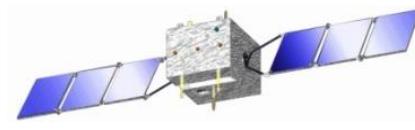
$$\frac{E_x^2}{E_{xo}^2} + \frac{E_y^2}{E_{yo}^2} = 1$$



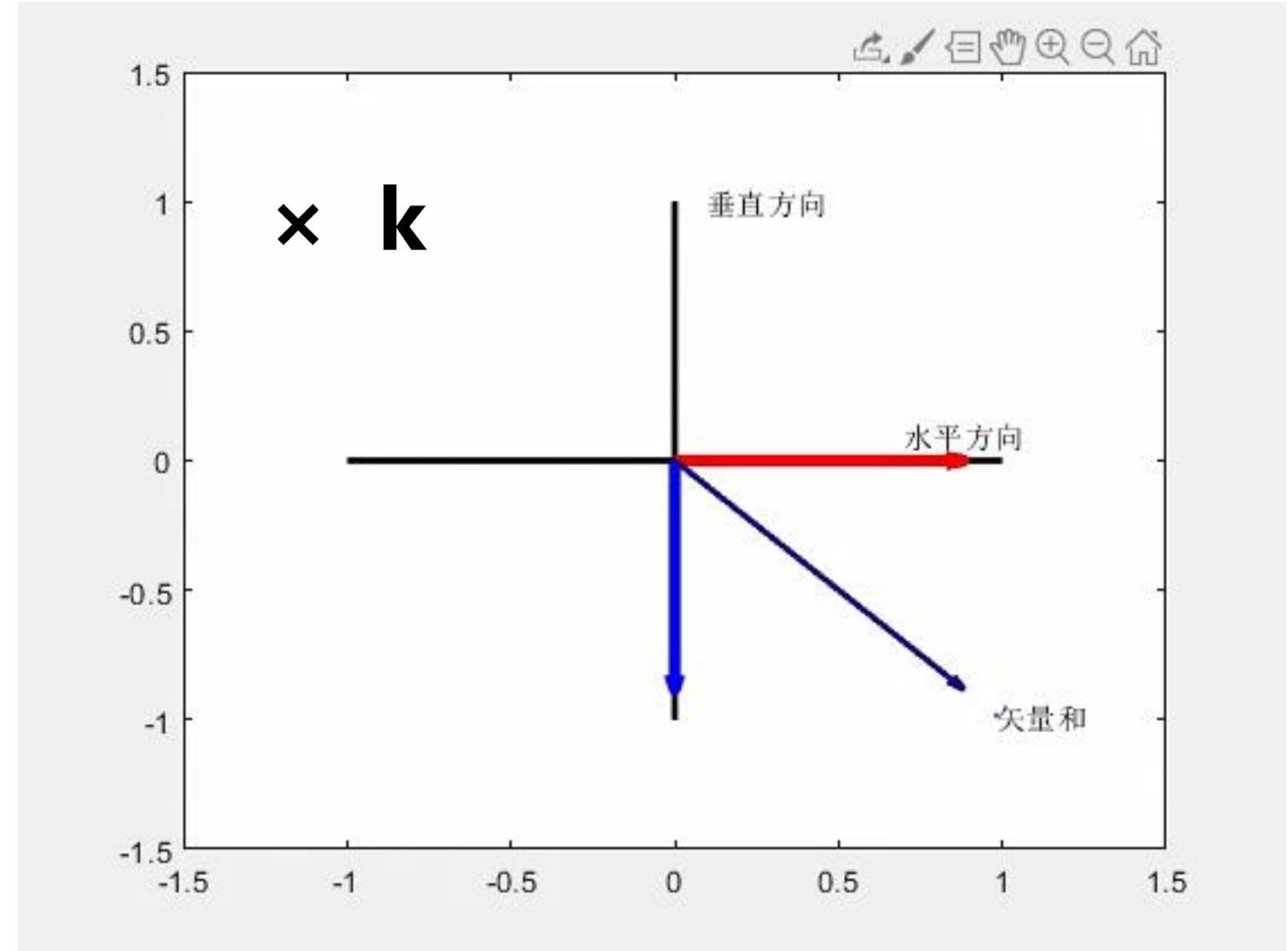
E 的端点在一个周期内的轨迹为椭圆，因此称椭圆偏振波。实部公式取“-”号时，逆时针旋转，称右旋椭圆偏振波（R波）；实部公式取“+”号时，顺时针旋转，称左旋椭圆偏振波（L波）。

当 $E_{xo} = E_{yo}$ 时，为圆偏振波，也有右旋左旋之分

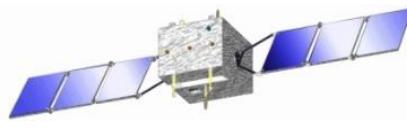
八十五、局地坐标系：MFA



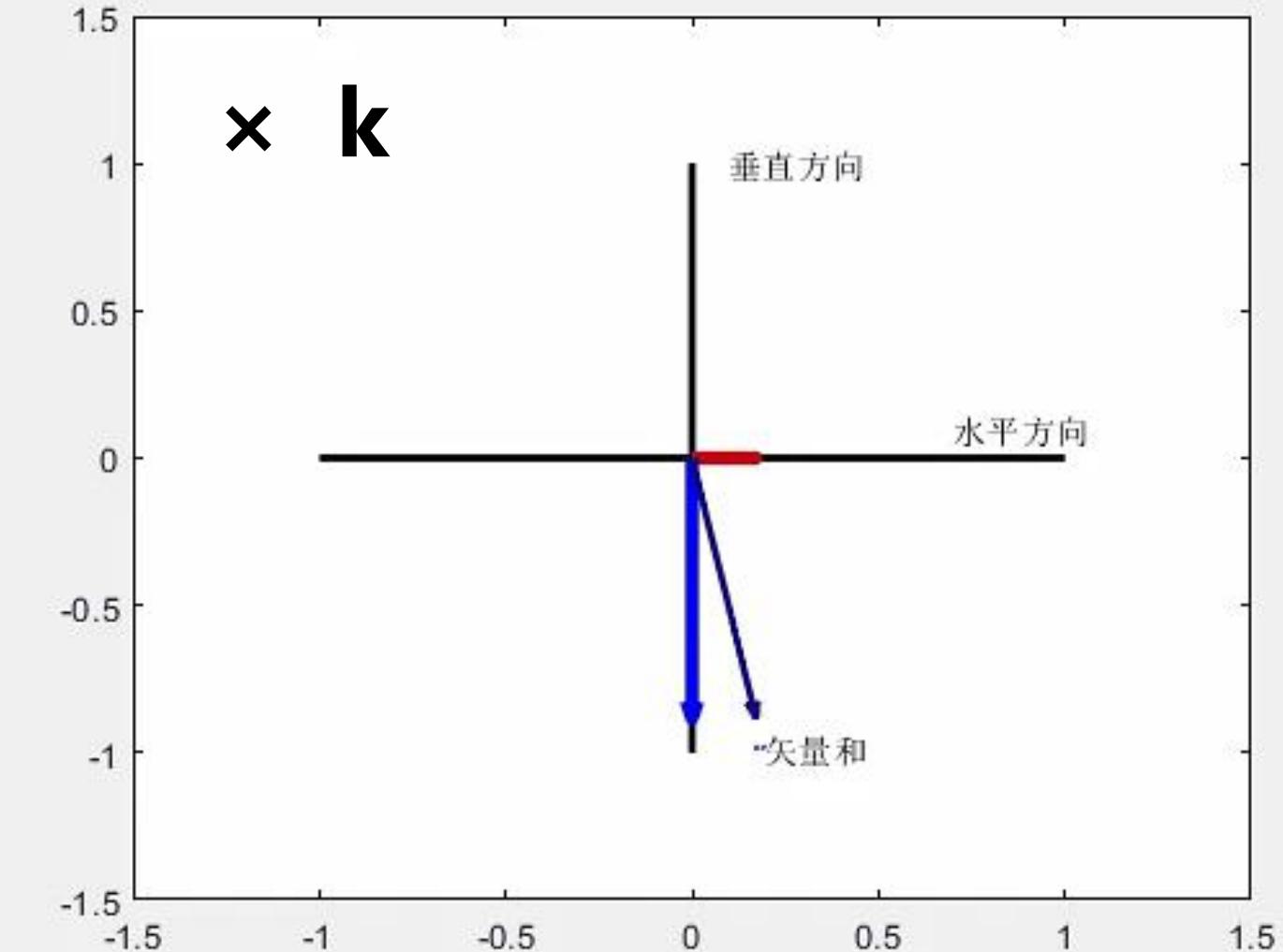
$k \parallel B$ 指向内，
线性极化
(引自知乎网)

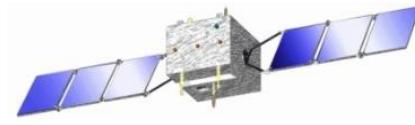


八十五、局地坐标系：MFA

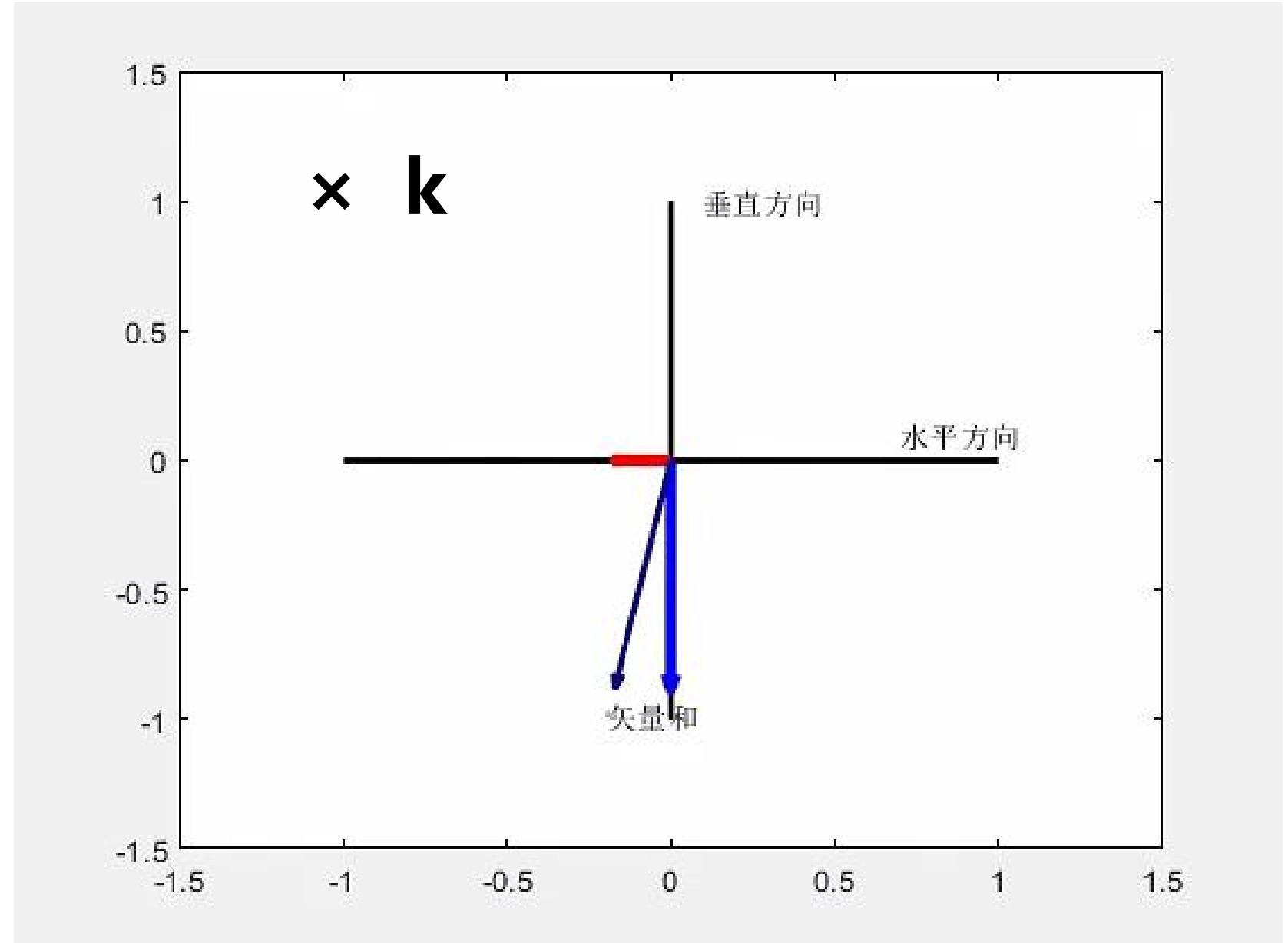


$k \parallel B$ 指向内，
左旋椭圆极化
(引自知乎网)

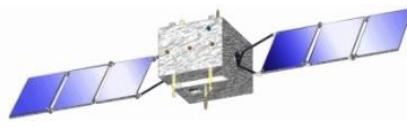




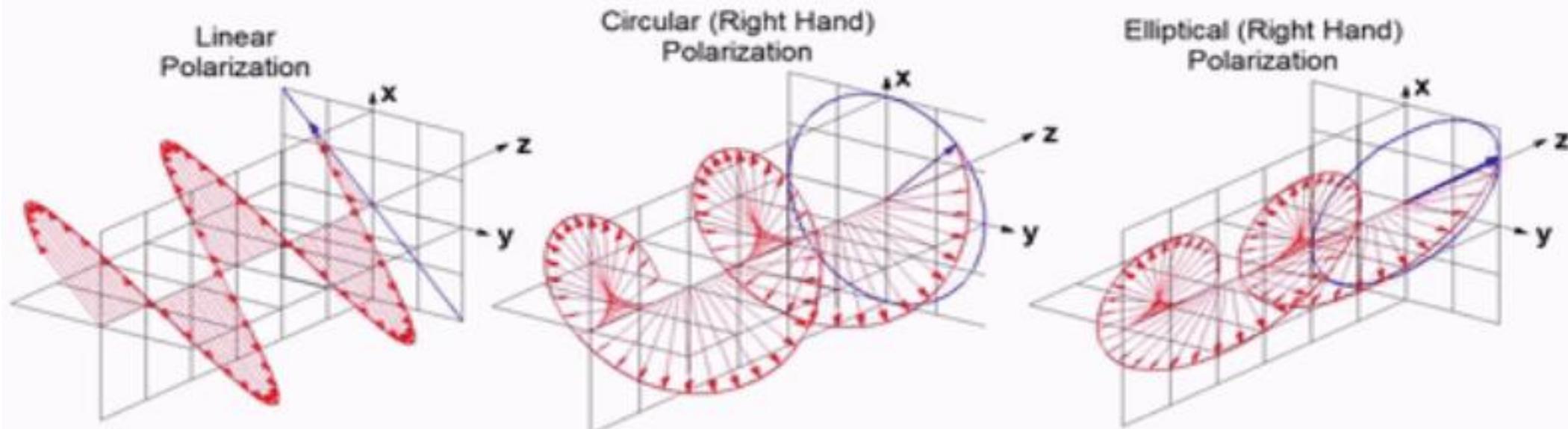
$k \parallel B$ 指向内，
右旋椭圆极化
(引自知乎网)

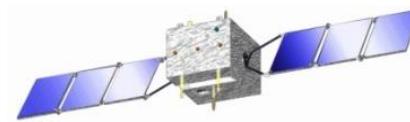


八十五、局地坐标系：MFA



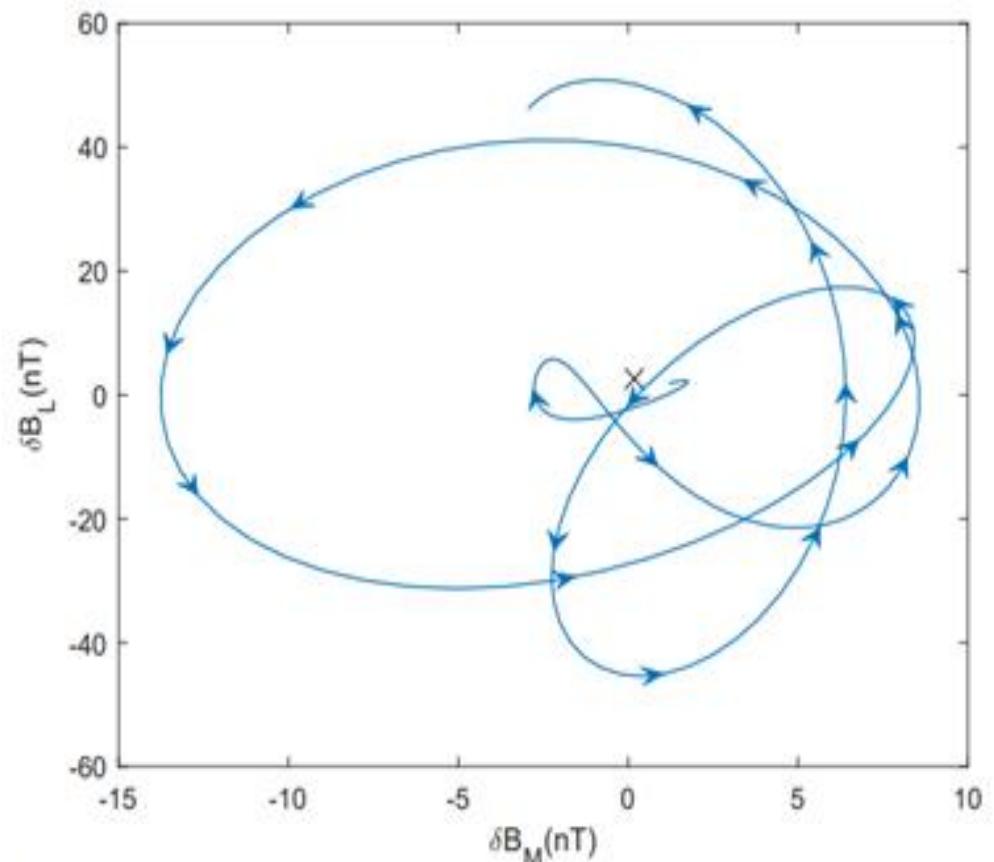
电磁波的三维传播特征（引自射频学堂）：



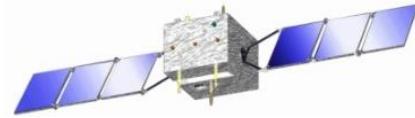


八十五、局地坐标系：MFA

例如，Band-pass filtering (Pc1-2 ~ 0.1 – 5 Hz) extracts three components of the wave magnetic field (δB_μ , δB_ν , δB_φ), and then one can plot the rotation direction of the vector (δB_ν , δB_φ) or calculate the wave polarization ellipticity (Li et al., 2016, POP)



八十五、局地坐标系：MFA

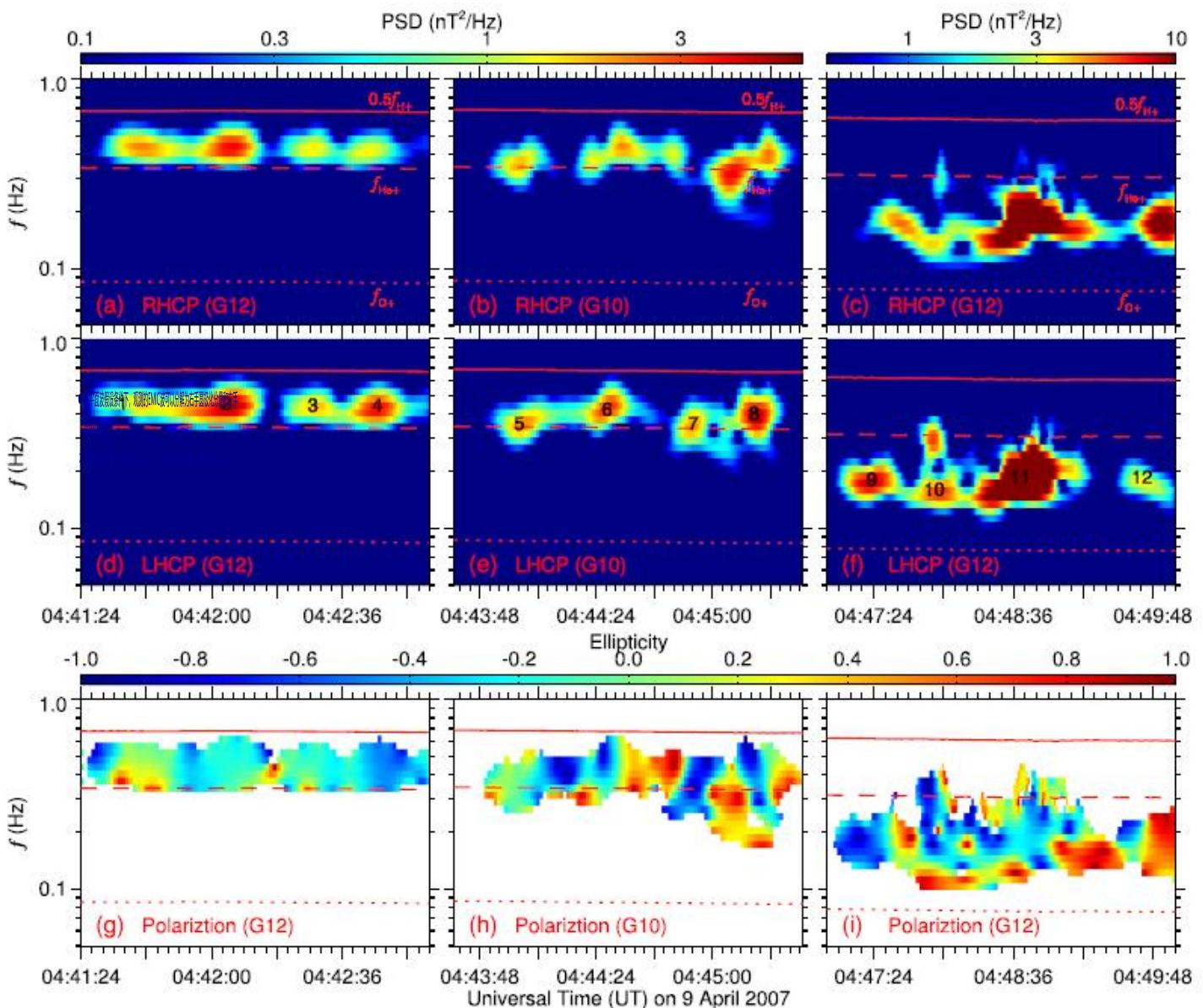


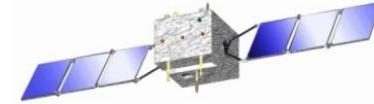
- 在平面波假设条件下，卫星观测
EMIC波可以分解为：

$$\text{右旋极化分量: } \delta B_R = \delta B_v - i\delta B_\varphi$$

$$\text{左旋极化分量: } \delta B_L = \delta B_v + i\delta B_\varphi$$

Li et al., 2016, POP

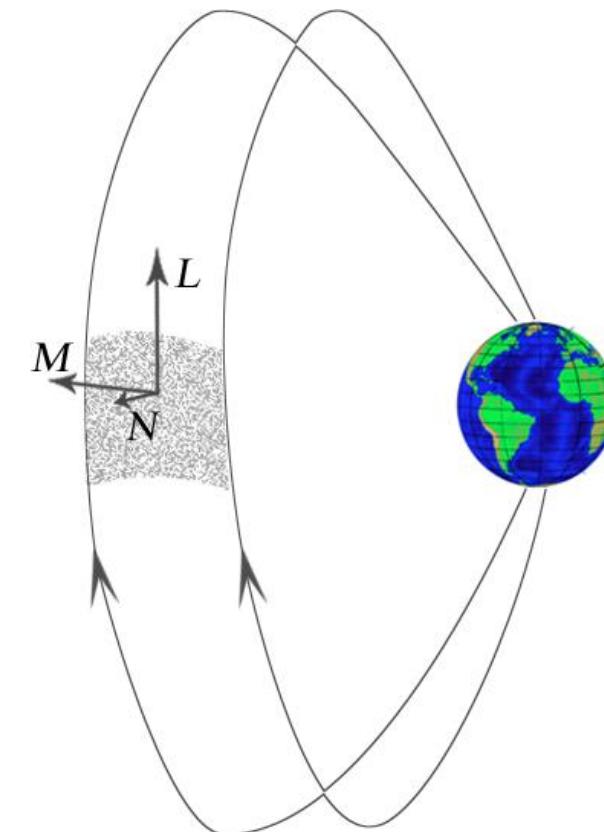


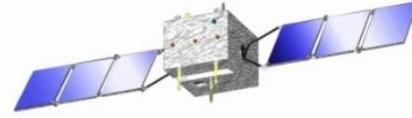


➤ 边界法线坐标系 (LMN)

在地球和行星磁层中存在许多切向不连续的间断面，譬如地球磁层顶和磁尾电流片等。在这样的自然边界上，可以定义直角坐标系，使 L - M 平面与边界面相切， N 轴沿边界面法线，这就是边界法线坐标系^[5]。

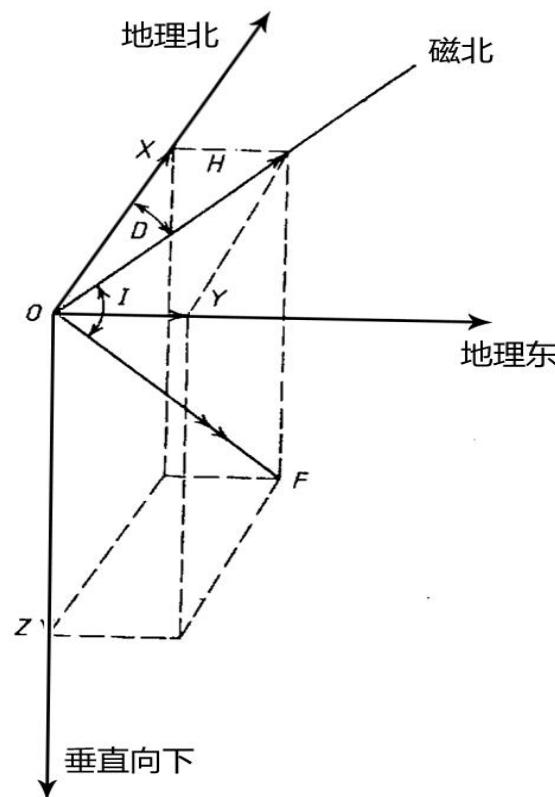
- ✓ 磁场或电场沿着边界法的变化最小 (N)，沿着边界切面有一个变化最大的方向 (L) 和一个中间变化的方向 (M)
- ✓ 边界法线坐标系可以使用最小变量分析法来确定。





► 地磁场观测点坐标系(HDZ)

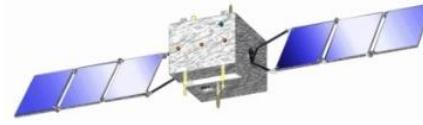
地磁场观测点坐标系以观测点为原点， X 轴指向地理北， Y 轴向地理东， Z 轴垂直向下。地磁场水平分量 (H) 与地理北向 (X 轴) 的夹角为磁偏角 D ；地磁场总矢量与水平面的夹角为磁倾角 I 。地磁场不同地磁要素之间的数学关系式为：



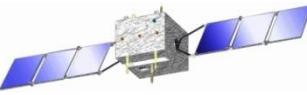
$$\left\{ \begin{array}{l} H = \sqrt{X^2 + Y^2} \\ F = \sqrt{H^2 + Z^2} \\ \tan D = \frac{Y}{X} \\ \sin D = \frac{Y}{H} \\ \tan I = \frac{Z}{H} \\ \sin I = \frac{Z}{F} \end{array} \right.$$

地磁场7要素：

水平分量 (H) 、
地磁总强度 (F) 、
垂直分量 (Z) 、
磁偏角 (D) 、
磁倾角 (I) 、
北向分量 (X) 、
东向分量 (Y)



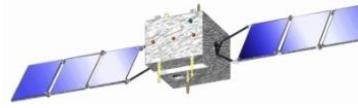
- 以上介绍的空间坐标系除了应用于地球空间之外，还可以推广到其他磁化行星物理领域（如图4.1所示）。可以采用行星轨道平面来确定 $X - Y$ 平面，以代替地球轨道中的黄道平面。同样，对于磁化行星，若其Y轴垂直于磁偶极轴和太阳指向所共有的平面，则可以使用GSM坐标系。即使对于仅仅具有弱感应磁场的金星和部分剩余磁场的火星，也可以将GSE坐标系推广到金星太阳轨道系及火星太阳轨道系。
- 在研究非磁化行星、彗星和磁化行星激波的逆流现象时，采用取向被磁场作用的坐标系也是很有用的。最普遍的方法是调整坐标系使其X轴指向太阳，磁场的指向在 $X - Y$ 平面上沿Y轴方向。因为太阳风在 $-X$ 方向附近流动，则太阳风的电场指向 $+Z$ 方向。任何新产生于彗星或行星附近的离子都可以在 Z 方向被加速。对金星来说，这种坐标系可以被称为是星际的太阳金星系（VSI），其他行星以此类推



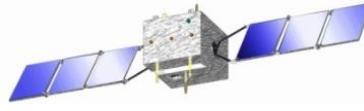
八十九、坐标变换工具包

- 如果知道两个坐标系之间的变化矩阵，就可以将空间探测矢量数据从一个坐标系变换到另外一个空间坐标系中。为了方便空间探测数据的处理和分析应用，国际上已公开发布了两种IDL版本的空间坐标系变换工具包：spedas工具包和Geopack工具包。
- Geopack DLM 动态链接模块可以通过以下网址下载 (<https://www.korthhaus.com/index.php/idl-software/idl-geopack-dlm/>) 或者通过搜索关键字“idl Geopack”找到最新下载地址。
- spedas工具包可以从以下网址下载 (<https://spedas.org/blog/>) 或者通过搜索关键字“spedas”找到最新的下载地址。

九十、Geopack工具调用方法



- 配置Geopack动态链接库
- 第一步、关闭正在使用的IDL程序编译器。
- 第二步、打开解压缩后 idl_geopack_* (譬如idl_geopack_109) 文件夹，根据个人电脑的CPU性能（32位或64位）和操作系统（win 32/64、linux32/64或mac64）选择相应文件中的idl_geopack.dll动态链接库文件，并且把idl_geopack.dll和解压缩文件夹中的geopack_demo和idl_geopack.dlm三个文件直接复制粘贴到安装好的IDL8.3 文件夹的 bin库里即可。
例如，将geopack_demo、idl_geopack.dll和idl_geopack.dlm拷贝到C:\Program Files\Exelis\IDL83\bin\bin.x86_64）。
- 第三步、重新启动IDL程序编译器即可调用Geopack坐标变换模块。



- 先调用geopack_recalc计算时间

语法格式 : geopack_recalc, year, doy, hour, min, sec

doy=julday(month,day,year)-julday(1,1,year) ;

注: doy is day of a year

例如: doy=julday(8,24,2005)-julday(1,1,2005)

- 再调geopack_conv_coord完成转化

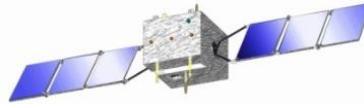
语法格式:

geopack_conv_coord, s1, s2, s3, d1, d2, d3 [,keywords (例如/from_gse, /to_gsm)]

Inputs: s1, s2, s3: Coordinates in system of origin.

Outputs: d1, d2, d3: Coordinates in target system.

九十、Geopack工具调用方法



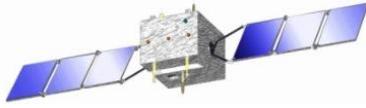
geopack_conv_coord输入参数和关键字

输入参数或关键字	功能
s1, s2, s3	原坐标系中的矢量三分量
d1, d2, d3	转换到目标坐标中的矢量三分量
/from GEO	从地理坐标转换到其他坐标系
/from MAG	从地磁坐标转换到其他坐标系
/from GEI	从地心赤道惯性坐标转换到其他坐标系
/from SM	从太阳磁坐标转换到其他坐标系
/from GSM	从地心太阳磁层坐标转换到其他坐标系
/from GSE	从地心黄道坐标转换到其他坐标系
/to GEO	从其他坐标系转换到地理坐标中
/to MAG	从其他坐标系转换到地磁坐标中
/to GEI	从其他坐标系转换到地心赤道惯性坐标中
/to SM	从其他坐标系转换到太阳磁坐标中
/to GSM	从其他坐标系转换到地心太阳磁层坐标中
/to GSE	从其他坐标系转换到地心黄道坐标中

- 注意： geopack_conv_coord 过程的输入参数s1, s2和s3不能是数组，只能是单个数据。调用该过程一次只能转换一个时刻的矢量数据。

例如，将GEOTAIL卫星测量的太阳风速度从GSE坐标系转换到GSM坐标系中。

[Transform coordinates with Geopack](#)



九十一、spedas工具包的调用方法

- 用户将下载的最新版本的spedas工具包解压缩后，直接将解压缩文件整个拷贝到安装好的IDL8.3文件夹里的lib库中。然后重新启动IDL程序编译器即可调用spedas中的**cotrans**坐标变化过程。要求输入**cotrans**过程的时间和矢量必须先存成tplot的变量类型。

例如，下列代码通过调用spedas工具包将GEOTAIL卫星测量的太阳风速度从GSE坐标系转换到GSM坐标系中。

[Transform_coordinates_with_Spedas](#)