

# 脉冲星：RS 模型

## Less and More

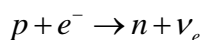
本文将围绕 Ruderman 与 Sutherland 于 1975 年发表的关于脉冲星辐射机制（RS 模型）的文章，省略文章中的一些证明但加上一些前因后果，试图把这一套理论简述清楚。

### 一、强磁场旋转中子星

在 RS 模型的框架下，脉冲星被认定为是强磁场旋转的中子星，这个认定本身蕴含了丰富的信息。

脉冲星强磁场的起源可以追溯到其前身星——一般是质量较大的恒星。据发电机模型，恒星具有一定强度的磁场，而在其经历了各种核燃烧，最后爆发成为致密星时，其空间尺度大幅减小；由于天体的磁冻结效应，致密星继承了前身星的磁通，磁通  $\Phi$  等于磁感应强度  $B$  乘面积，致密星对应的面积相较前身星大大减小了，磁场于是大大增强了，是为脉冲星强磁场。

尽管脉冲星的真实物态还未确定，其中子星的认定可以较直观地给出一个重要信息——星体存在荷电粒子，中子星并非“全是中子的星体”。朗道指出，“中子化”的起因是在物质高度压缩（形成致密星）的过程中，电子数密度增大好多个数量级，使得反应：



得以很好地正向进行。但是这个反应，与化学反应类似，遵循热力学的结论，存在反应平衡，还会有一些电子和质子存在于中子星。

有了上面这些铺垫，我们可以引出脉冲星辐射的重要概念——磁层(magnetosphere)。

### 二、脉冲星磁层

磁层的存在与上一部分所提到的三个因素密切相关：强磁场、旋转、荷电粒子。

磁层产生的逻辑大致是这样的（参考了 Goldreich 与 Julian 于 1969 年发表的文章的观点）：旋转的磁场伴随着电场，如此电场——根据计算——足够把星体表面的荷电粒子剥离出来；这些荷电粒子在表面以上受电磁场作用形成一定的分布，最终效果使得沿磁力线方向上的电场强度为 0。于是最初的磁层——应该说成是“磁化等离子体层”——就这样形成了。

磁层稳定共转条件，见天体物理笔记

Goldreich 和 Julian 基于上述“共转系中  $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = 0$ ”的要求给出了一般称为“GJ 电荷密度”的静态磁层电荷密度分布，即：

$$\rho_{GJ} = -\frac{\vec{\Omega} \cdot \vec{B}}{2\pi c} \cdot \frac{1}{1 - (\Omega r \sin \theta / c)^2}$$

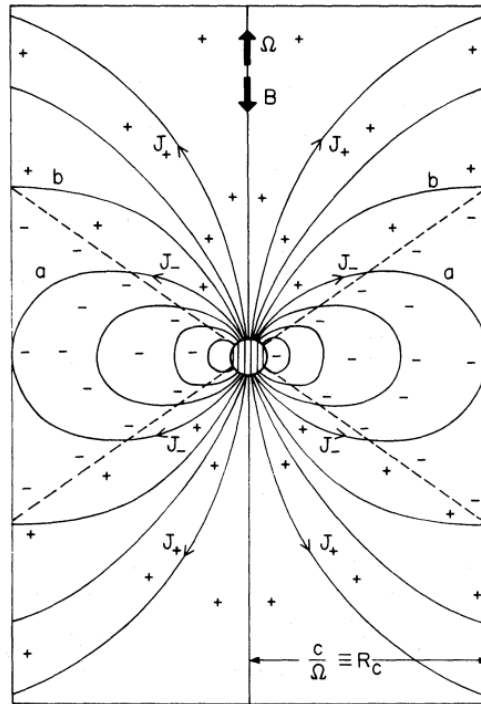
共转系中的“开放磁力线”可以是闭合的

这个量的正负会带来一个正负电荷的分界线（零电荷面）

这里顺带描述脉冲星磁力线的几何（Goldreich 和 Julian、Ruderman 和 Sutherland 都描述了磁轴与自转轴共线的情形）。我们所讨论的磁场都是共转的，也就是光速圆柱（半径  $R=c/\Omega$ ）以内的。对距离脉冲星星体表面有一定距离的磁场区域，偶极磁场是很好的近似，但在星体表面附近，多极场的效应会变得明显。按照 Goldreich 和 Julian 的观点，有两种磁力线是特殊且重要的：一为临界(critical)磁力线，是经过光速圆柱面与零电荷面交线的磁力

### 来自零电荷面交线的定义

线（零电荷面即根据上面给出的“GJ 电荷密度”的零电荷面，其上的磁场方向都与转轴垂直），同时根据偶极磁场的计算结果，临界磁力线与光速圆柱面是垂直的；二为最后开放(last open)磁力线，磁力线本身是闭合曲线，但是荷电粒子可以通过一些靠近磁轴的磁力线离开脉冲星的束缚，这样的磁力线即“开放磁力线”，最后开放磁力线——顾名思义——即离磁轴最远、或者说“磁纬”最低的“开放磁力线”，其与光速圆柱面相切。最后开放磁力线与脉冲星体表面的交点划出来的一片磁轴周围的区域即极冠区(polar cap)，极冠区中的荷电粒子有机会通过磁力线逃离脉冲星。



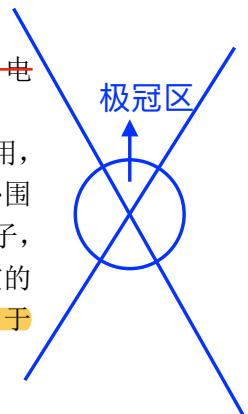
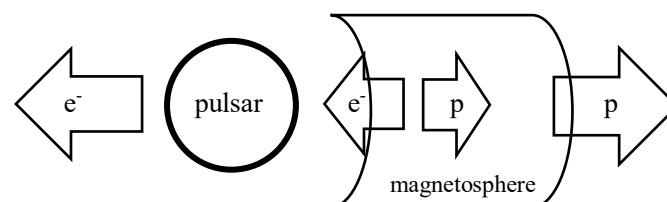
这里的图取了 Ruderman 与 Sutherland 1975 年文章的 FIG.1, 其中 a 线为最后开放磁力线, b 线为临界磁力线。有了关于磁层和磁场的一系列信息, 我们得以一窥 RS 模型的一个核心概念——间隙(gap).

### 三、间隙

~~在正式讨论极冠区间隙之前, Ruderman 和 Sutherland 论证说明了在磁层形成之后, 电子可以从极冠区中有效地出射, 但正电荷会被束缚在极冠区。~~

间隙的形成源于磁层中的电荷流动。由于速度高、离心力大以及扭曲磁场与电场的作用, 光速圆柱面附近的正电荷会离开磁层, 从光速圆柱面逃逸并且一般不再回来。为了补偿外围磁层流失的正电荷 (以使该区域电荷分布重新满足 GJ 密度) 以及补偿极冠区流失的电子, 内部磁层的正电荷外流而负电荷内流, 使这块区域的正负电荷都流失, 形成了一个被掏空的区域——一个不断生长的真空间隙。间隙中由于没有磁层中那样的等离子与电磁场作用, 于是存在磁力线方向上的电场,  $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$  不等于 0。于是出射的电子会被加速

$$E = v \times B / c^2$$



间隙中  $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$  不等于 0，也就是说荷电粒子可以在其中沿着磁力线被加速。但是目前看了间隙是真空的，没有待加速的粒子。另外间隙随着电荷流动不断地增长，有限制增长的因素吗？这涉及到 RS 模型的另一重要过程——间隙的破坏与“火花(sparks)放电”。

#### 四、雪崩、火花与制动

间隙并不会一直保持真空，因为会有外部光子进入到间隙中，比如银河系的背景光子。

能量大于两倍电子静能的光子在磁场中能够产生一对正负电子，之后受间隙中电场作用，正电子外流而负电子流向星体表面。当间隙增长到一定程度，沿磁力线方向电场大到一定程度时，由初始光子产生的正电子在间隙中加速，又辐射出光子，光子再产生正负电子对……在强电场中如此级联反应得以进行——如此“雪崩”的过程遏止了间隙的增长，且随着间隙内荷电粒子数的增加，间隙中的一些特定点由于等离子体与电磁场的作用，原本不为零的  $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$  很快减小了，这个过程被称为间隙的放电(discharge)，其结果是在间隙中产生一个局域的火花(spark)，向间隙以上的磁层发射正电子束。

从火花进入较高磁层的相对论性正电子贴着磁力线运动，产生曲率辐射。以上的过程也可以体现出 RS 模型要求的能量转化关系：荷电粒子从平行电场中提取能量用于后续过程，而平行电场的能量来源于星体的转动——即加速辐射过程提取了星体的转动能，如此转动供能是星体转动制动(braking)的来源。

但若只计算这些正电子产生辐射的直接相加，远达不到观测到的实际辐射强度。这要归因到接下来所要描述的正电子的群聚(bunching)与相干(coherent)辐射。

#### 五、群聚与相干

RS 模型中正电子会由于等离子体的“双流不稳定性”产生一个空间上的群聚。在等离子体情形下，双流不稳定性体现为：当带电粒子束通过等离子体时，束中粒子运动受电磁作用扰动，引起一定程度的群聚，群聚产生电场，电场又进一步增强群聚。

群聚了的正电子有相近的产生条件，又因此在差不多的空间位置上发出辐射，这样的辐射于是就是相干加强了（类似干涉相长），能够符合观测的强度要求。

至此，Ruderman 与 Sutherland 吸收前人成果并加入自己的创想，对脉冲星的辐射过程给出了一些解释。

本文到此结束。

曹顺顺

2021.8 于浙江东阳