

《天体物理学》

第八章 脉冲星

讲授：徐仁新

北京大学物理学院天文学系

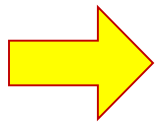
为什么要研究脉冲星？

- 极端的物理“实验室”：

强引力场：质量 $\sim M_{\odot}$ 的脉冲星半径约只有 r_s 的三倍

强电磁场： $B \sim 10^{12} \text{ G}$, $E \sim 10^{11} \text{ V/cm}$

超核密度：具有极端的强作用和弱作用



脉冲星是集自然界**四大基本相互作用**于一身的、极端物理条件下的“天然实验室”。

- 极稳定的时钟：

精确测量：探测nHz引力波，认识引力的本质

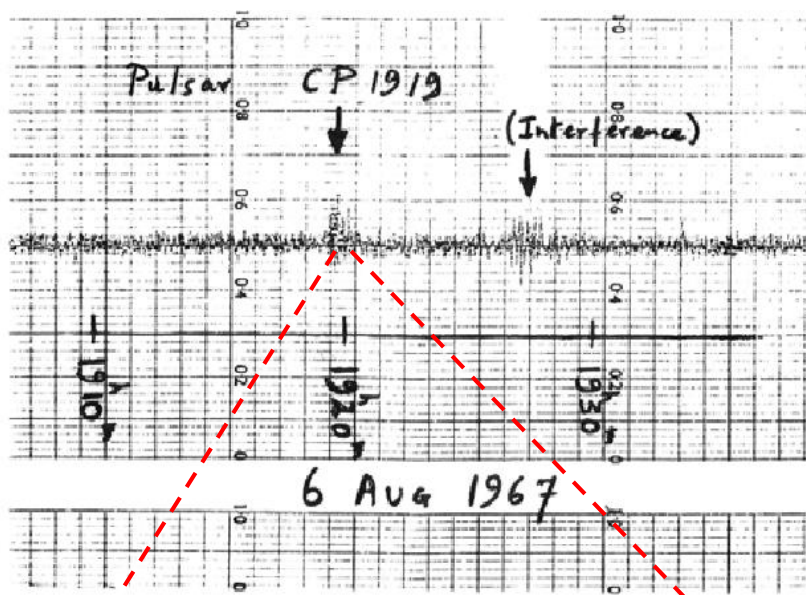
工程应用：脉冲星时，自主导航

- 时代的呼唤：FAST, SKA, HXMT, eXTP...

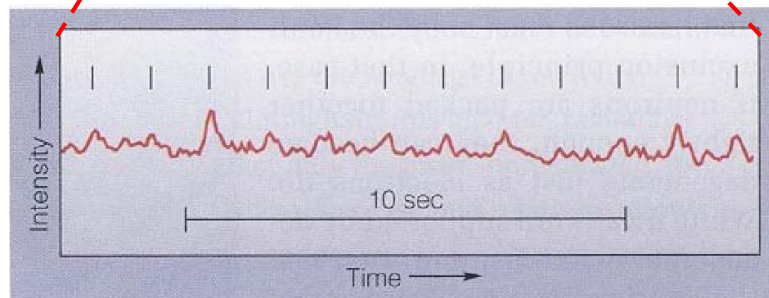
脉冲星的发现



1999



1967



2006年4月14日访问北京大学



“Intro. to Astrophysics”

<http://vega.bac.pku.edu.cn/rxxu>

R. X. Xu

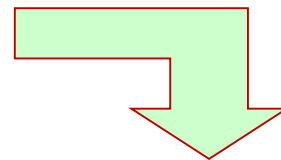
中国脉冲星研究的未来之一： FAST!



2016年4月3日

1, 脉冲星类天体的观测表现

转动供能 (rotation-powered)



- 射电脉冲星=正常PSR+毫秒PSR

X射线脉冲星

γ 射线脉冲星

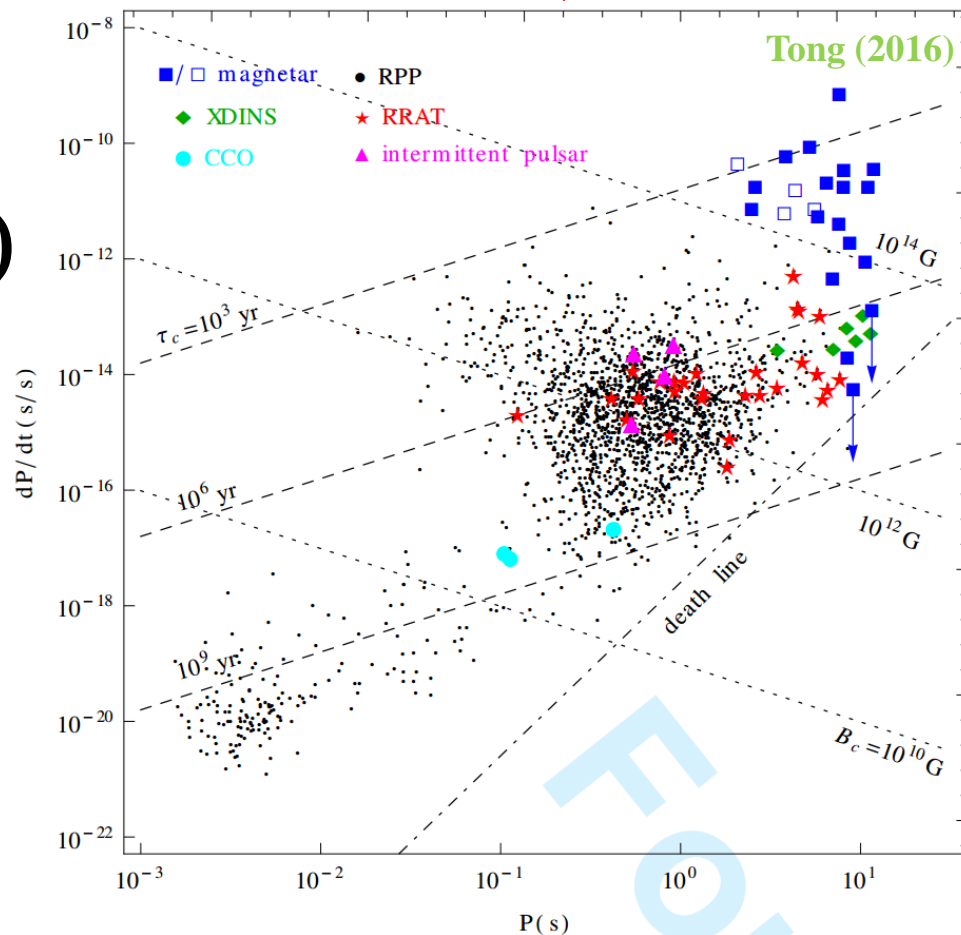
吸积供能 (accretion)

- X射线脉冲星

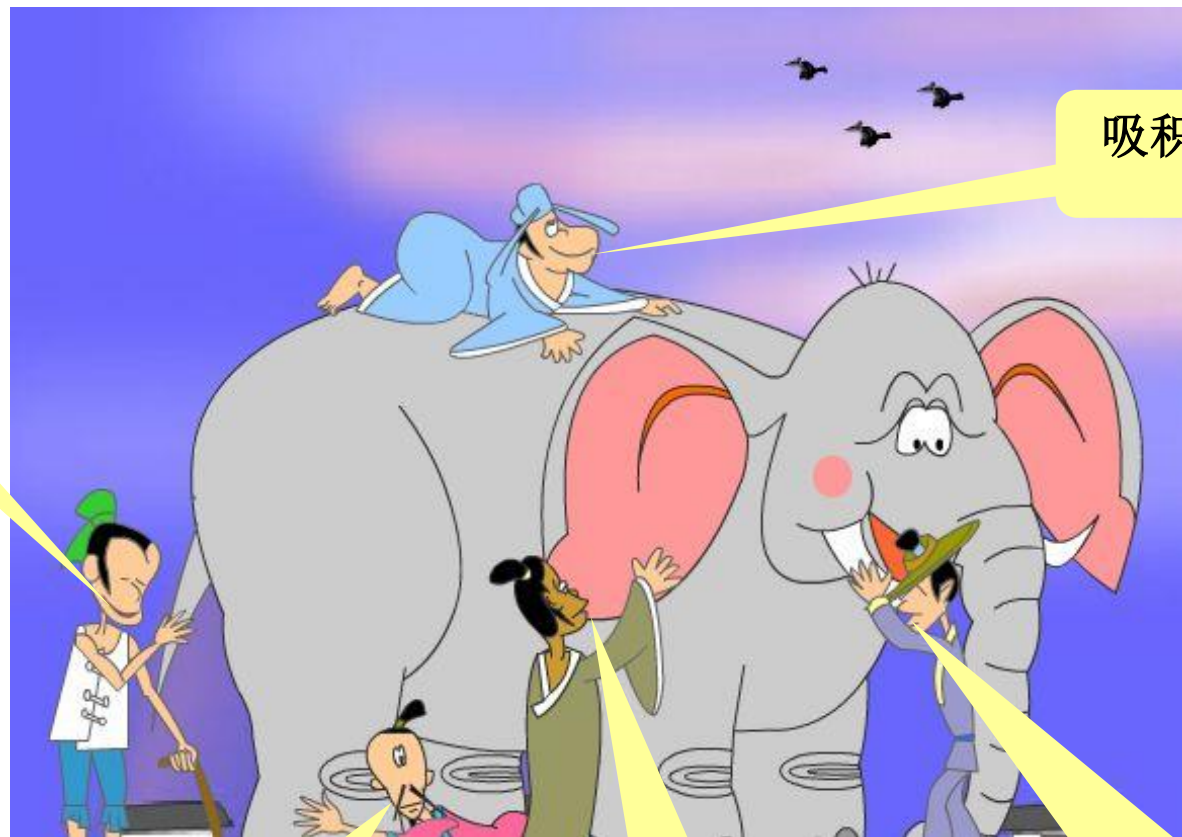
- X射线爆

? 供能

- 软 γ 射线重复爆: 磁能?
- 反常X射线脉冲星: 磁能?
- 中心致密天体: 热能?
- 暗热“中子”星: 热能? !



1, 脉冲星类天体的观测表现



中心致密天体

吸积X射线脉冲星
X射线爆

暗热“中子”星

射电脉冲星

反常X射线脉冲星
软γ射线重复爆

2, 脉冲星类天体的形成

诞生温度的估计 (原中子星):

- 总能量 (引力能): $E_g \sim GM^2/R \sim 10^{53} \text{ erg}$
- Fermi气筒并能:

$$\text{平均重子数密度 } n_B = M/(m_u \cdot 4\pi R^3/3) = 2.86 \times 10^{38} \text{ cm}^{-3}$$

$$\text{Fermi动量, } cp_F = 9.75 \times 10^{-17} n_B^{1/3} = 6.42 \times 10^{-4} \text{ erg} = 400 \text{ MeV}$$

$$\text{Fermi气筒并能 } E_d \sim cp_F M/m_u \sim 10^{53} \text{ erg} \sim E_g$$

- 自转动能 $E_r \sim I(2\pi/P)^2 \sim 10^{50} \text{ erg} \ll E_g$
- 踢动能 $E_k \sim M V_k^2 \sim 10^{47} V_{k7}^2 \text{ erg} \ll E_g$
- 热能与筒并能同量级: $E_{th} \sim E_g - E_d \sim E_g \sim 10^{53} \text{ erg}$

$$C_V T \sim E_{th} \Rightarrow T \sim [cP_F m_u E_{th} / (k^2 M)]^{1/2} \sim 10^{12} \text{ K} \sim \mathbf{90 \text{ MeV} !}$$

$$\text{其中: } C_V \sim k\varepsilon M/m_u, \quad \varepsilon \sim kT/(E_F - mc^2)$$

- 超新星爆发数值模拟: 原中子星温度(30~50)MeV

2, 脉冲星类天体的形成

冷却机制:

• $T > \sim 10^9 \text{K}$: 热中微子发射, 如: $2\gamma \leftrightarrow e^\pm \rightarrow \nu + \bar{\nu}$

• $T < \sim 10^9 \text{K}$: **URCA过程**

DURCA: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

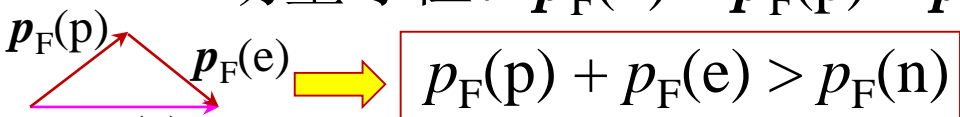
MURCA: $b + n \rightarrow b + p + e^- + \bar{\nu}_e$, $b + p + e^- \rightarrow b + n + \nu_e$

• **DURCA发生的条件 (运动学)**

参与反应粒子: Fermi面附近

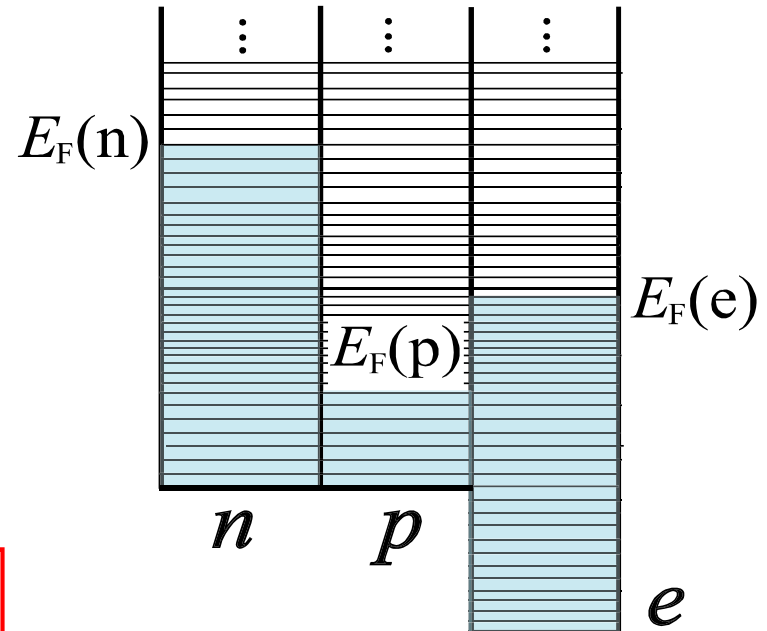
能量守恒: 自然满足

动量守恒: $p_F(n) = p_F(p) + p_F(e)$



又: $p_F \sim n^{1/3}$, **电中性** $n_p = n_e$

$\Rightarrow 2n_p^{1/3} > n_n^{1/3}$ 。即: $(n_p/n_n) > 1/8$



3, 质量-半径关系的计算

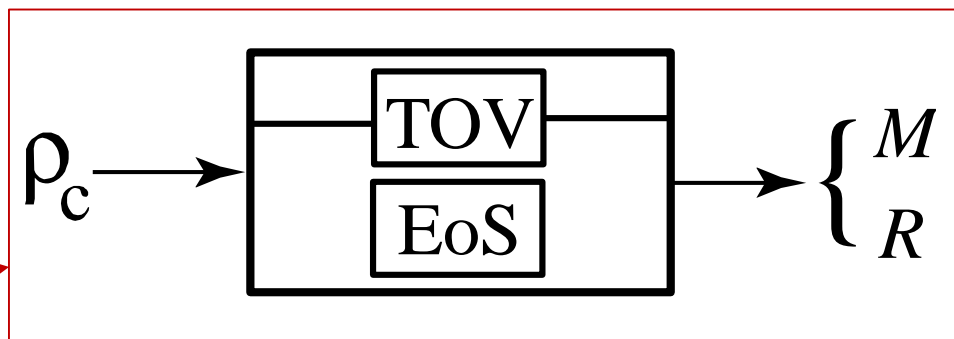
为何要关心质量-半径关系?

- 理论上: 不同物态 \rightarrow 不同质量 M 和半径 R
- 观测上: 只与 M 、 R 间某一关系有关, 如 $g(M/R^2)$ 、 $z(M/R)$

如何计算质量-半径关系?

- 作冷星处理, 依状态方程和流体静力学平衡方程定星结构模型
- 理想流体 Tolman-Oppenheimer-Volkoff 方程 (考虑 GR 修正后)

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm(r)\rho}{r^2} \frac{\left(1 + \frac{P}{\rho c^2}\right) \left(1 + \frac{4\pi r^3 P}{m(r)c^2}\right)}{1 - \frac{2Gm(r)}{rc^2}}$$



- 计算过程:

$$\rho_c \equiv \rho(r=0) \xrightarrow{\text{EoS}} P(r=0) \xrightarrow{\text{TOV}} P(r=\delta r) = P(r=0) + \left. \frac{dP}{dr} \right|_{r=0} \delta r \xrightarrow{\text{EoS}} \rho(r=\delta r) \rightarrow \dots$$

3, 质量-半径关系的计算

质量-半径关系计算一例:

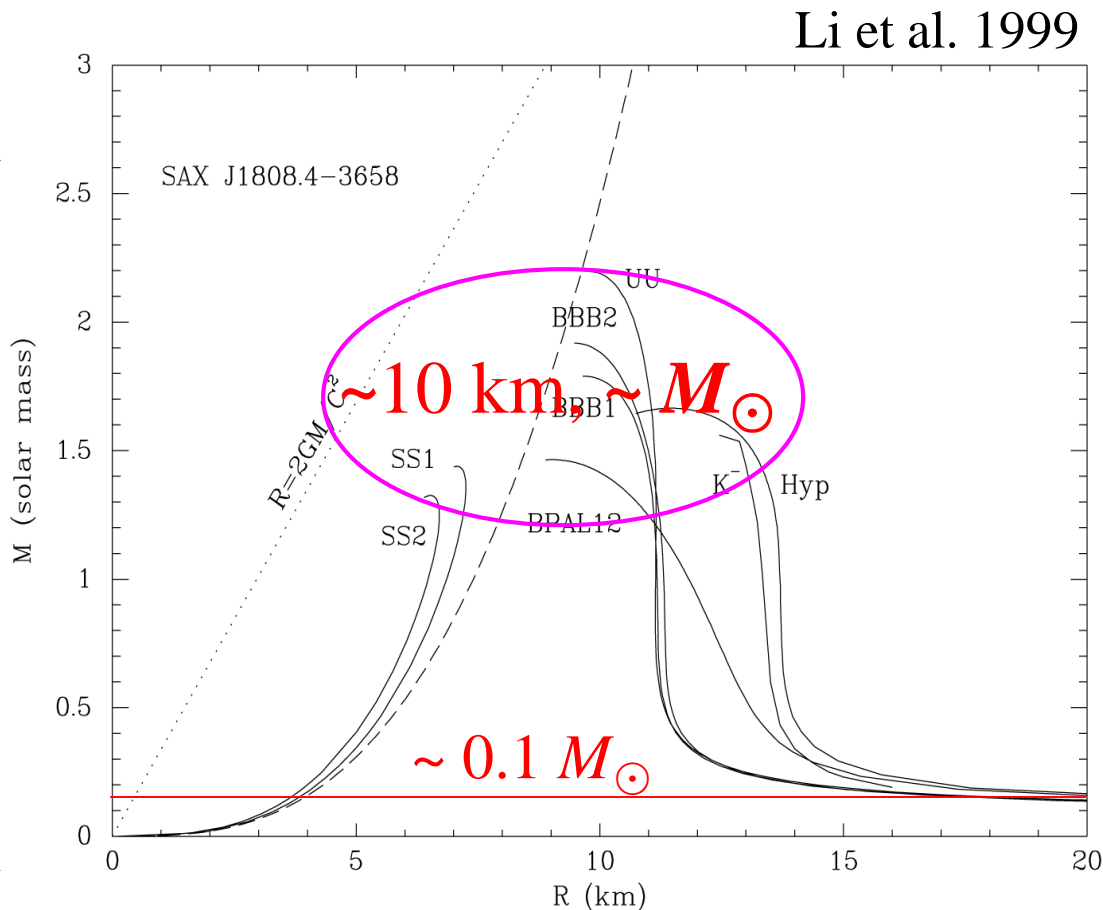
- 极限质量相近, $\sim M_{\odot}$
- 极限质量时半径 $\sim 10\text{km}$
- 小质量中子星:

$$M \propto R^{-3}$$

- 小质量夸克星:

$$M \propto R^3$$

- 中子星 $M_{\min} \sim 0.1 M_{\odot}$
- 夸克星 $M_{\min} \sim 0$
- 观测到 SAX J1808.4 的 MR 关系或不与 NS 吻合



4, 中子星的结构

整体结构：由外向内

简并电子气中的 β -衰变？



- 大气层

热X射线辐射于此

- 外壳层

固体，富中子核

- 内壳层

超流中子

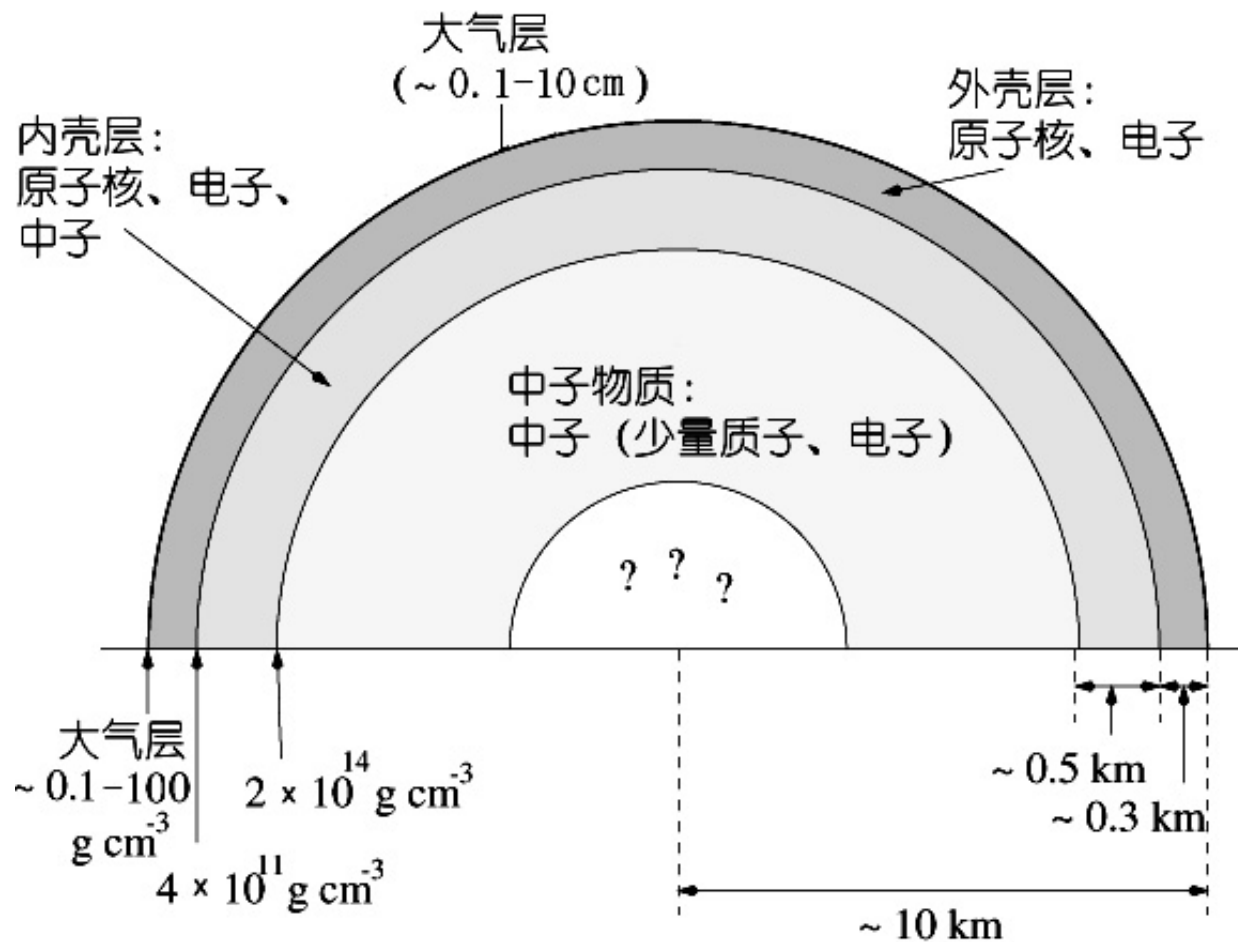
钉扎过程：glitch？

- 中子物质区

超流n、超导p

- 中子星的核

夸克物质相？



4, 中子星的结构

强磁场中子星表层物质:

- 何时磁场足够强?

Coulomb能 $\sim e^2/a_B$

电子回旋能 $\sim eB/(mc)$

→ $B > B_0 \equiv \frac{e^3 m^2 c}{\hbar^3} = 3.35 \times 10^9 \text{ G}$

- 电子云“柱”对称分布

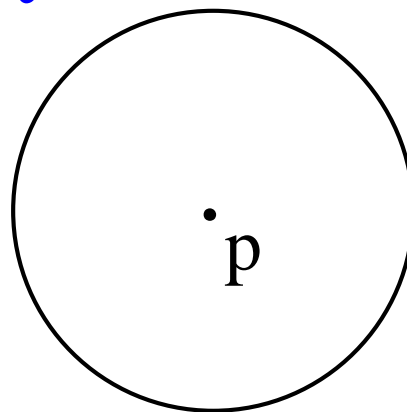
结合能增加: $E = -4.4 (\ln b)^2 \text{ (eV)}$!

例: $B = 10^{12} \text{ G}$, $|E| = 161 \text{ eV} \gg 13.6 \text{ eV}$ ($B = 0$: $E_n = -13.6/n^2 \text{ eV}$)

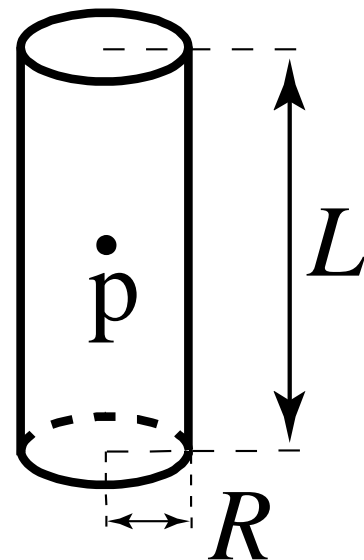
- 分子链

两个分离较远的柱形原子靠在一起时会放出能量! $\text{H}_2, \dots, \text{H}_n$

要将其中一个原子从分子链中断开需要作功 → 粘合能



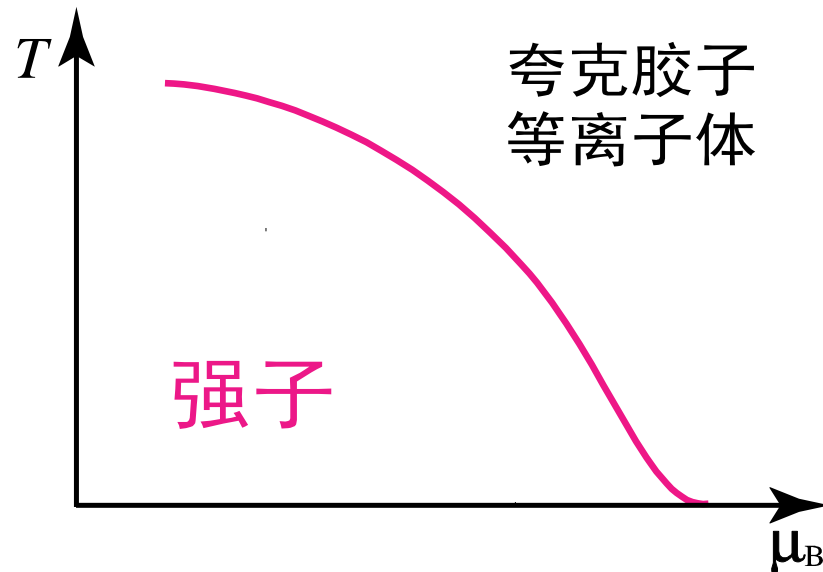
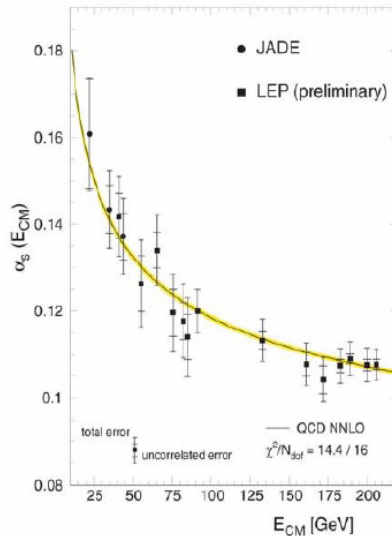
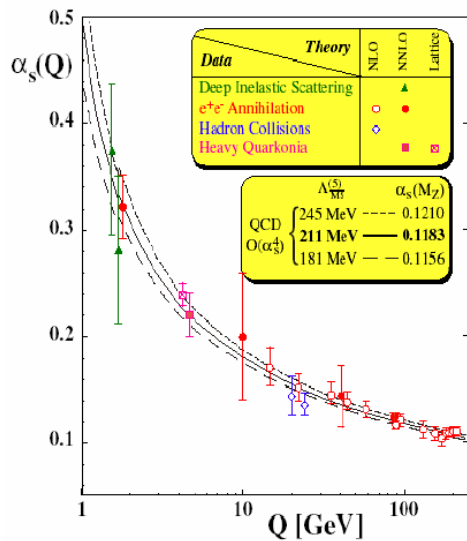
$B = 0$



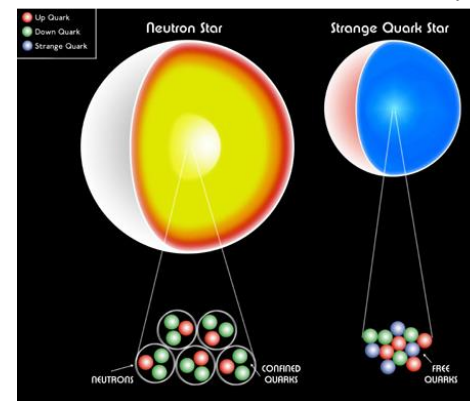
$B \neq 0$

5, 奇异夸克星的结构

渐近自由 \Rightarrow 夸克物质?

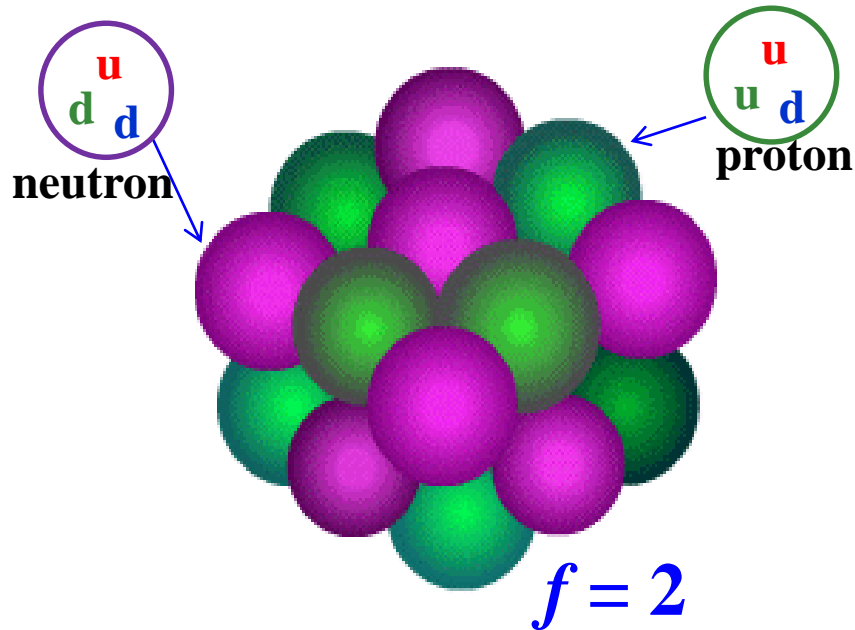


- **Witten猜想:** 大块奇异夸克物质是最稳定的! 由几乎等量的u、d、s等夸克组成**SQM**
- **奇异(夸克)星:** 奇异夸克物质组成星体 粲夸克星? ($\rho > 10^{17} \sim 10^{18} \text{ g/cm}^3$)



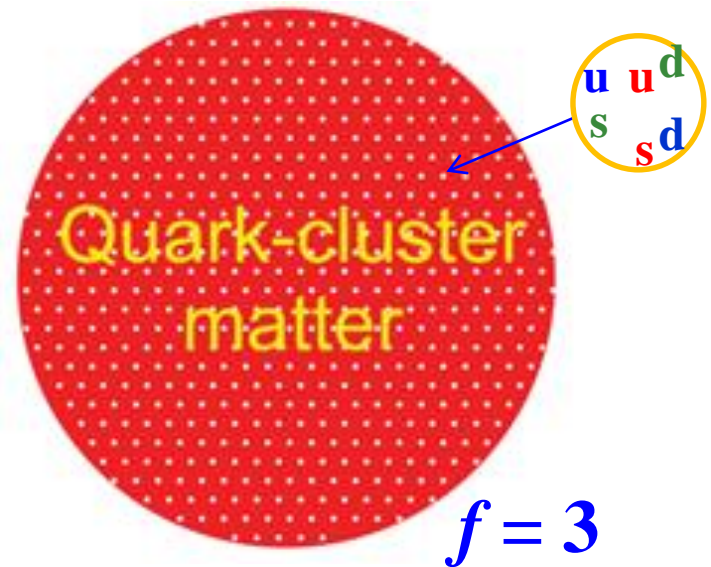
5, 奇异夸克星的结构

广义 Witten 猜想 \Rightarrow 三味大原子核?



$\sim \text{fm}$

Quantum gas/liquid?



$\gg \lambda_c \sim 10^3 \text{fm}$

Classical solid?!

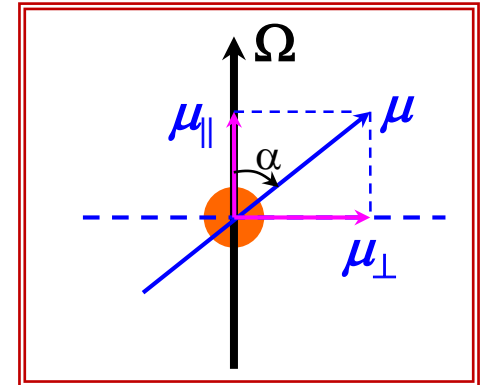
Strange Matter: *condensed matter* of strange cluster!
(an extension of the Bodmer–Witten's conjecture for strange quark matter)

6, 转动供能脉冲星

μ_{\perp} 主导: 磁偶极辐射模型

- 磁矩 μ_{\perp} 斜转子的电磁波辐射功率:

$$\dot{E}_d = -\frac{2}{3c^3} \mu_{\perp}^2 \Omega^4 \rightarrow I \Omega \dot{\Omega}$$



注意到 $\mu_{\perp} = BR^3 \sin \alpha / 2$, 得到脉冲星表面磁场强度:

$$B = \frac{1}{\sin \alpha} \sqrt{\frac{3Ic^3 P \dot{P}}{8\pi^2 R^6}} \approx 6.4 \times 10^{19} \sqrt{P \dot{P}} / \sin \alpha \quad \text{G}$$

以上用到了典型参数 $I=10^{45} \text{ g cm}^2$, 半径 $R=10^6 \text{ cm}$

- 制动指数 n :

$$\dot{\Omega} = -K \Omega^n \Leftrightarrow n = \frac{\Omega \ddot{\Omega}}{\dot{\Omega}^2}$$

若 μ_{\perp} 主导, $n = 3$!

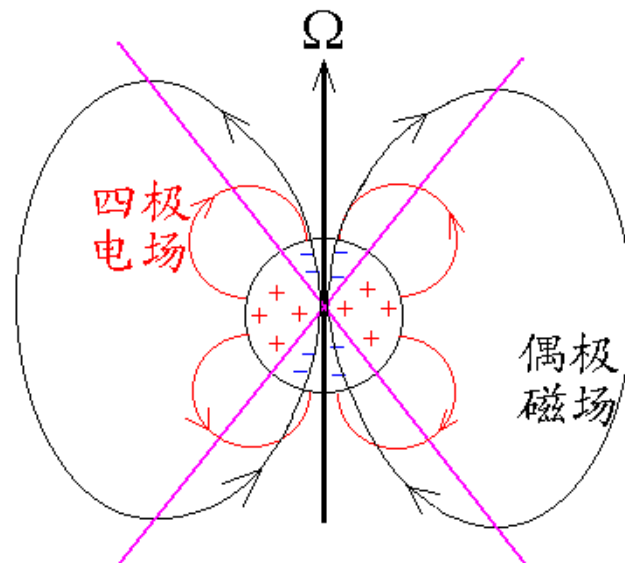
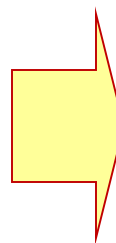
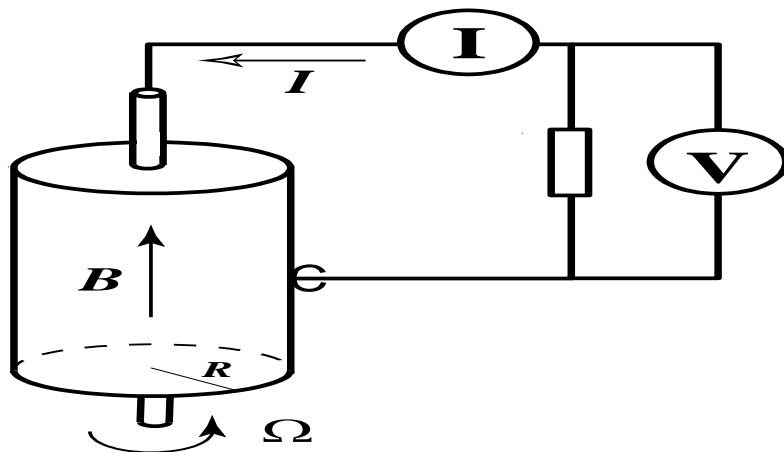
B0531+21	B1509-58	B0540-69	B0833-45	J1119-6127
2.51	2.84	2.2	1.4	2.91

X-ray: J1846-0258: $n = 2.65$

6, 转动供能脉冲星

$\mu_{||}$ 主导: 脉冲星磁层与粒子加速

- 单极感应效应:

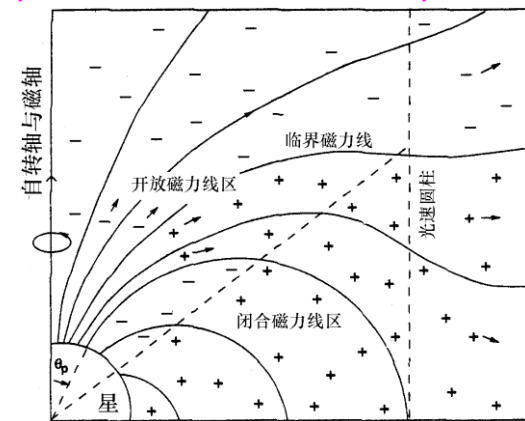


表面引力与电力之比:

$$\frac{GMm}{R^2} / \frac{e\Omega RB}{c} \sim 10^{-9} \ll 1 \Rightarrow \text{建立磁层} \rightarrow$$

- 磁层电荷密度: **GJ密度** (Goudreich-Julian)

$$\epsilon + (\Omega \times r/c) \times B + f = 0 \Rightarrow \rho_{\text{GJ}} = \frac{\nabla \cdot \vec{\epsilon}}{4\pi} \approx -\frac{\vec{\Omega} \cdot \vec{B}}{2\pi c} \quad (f=0)$$



6, 转动供能脉冲星

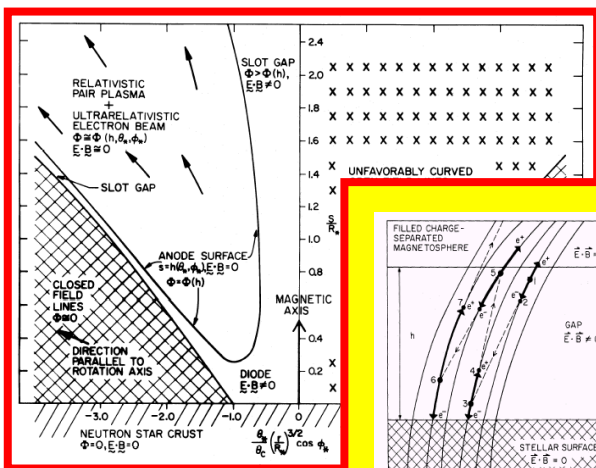
$\mu_{||}$ 主导: 脉冲星磁层中粒子的加速区

- 共转系中等效地写出的“Poisson方程”:

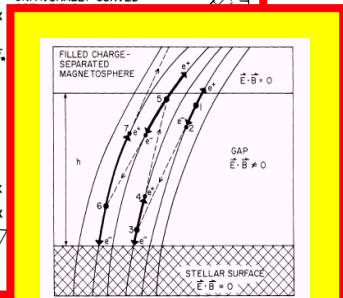
$$\text{div } \mathbf{E} = 4\pi(\rho - \rho_{\text{GJ}})$$

→ 任何一种偏离 ρ_{GJ} 的电荷分布必将导致加速的电场: $\mathbf{E} \neq 0$!

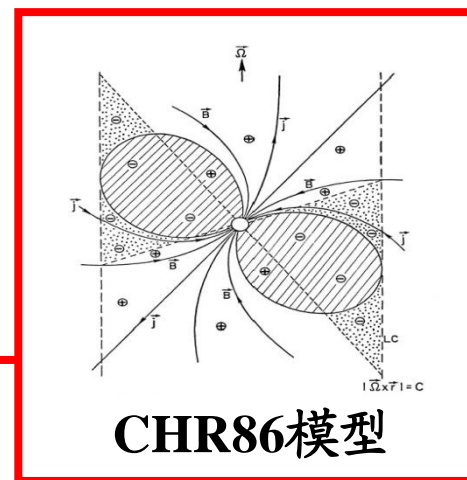
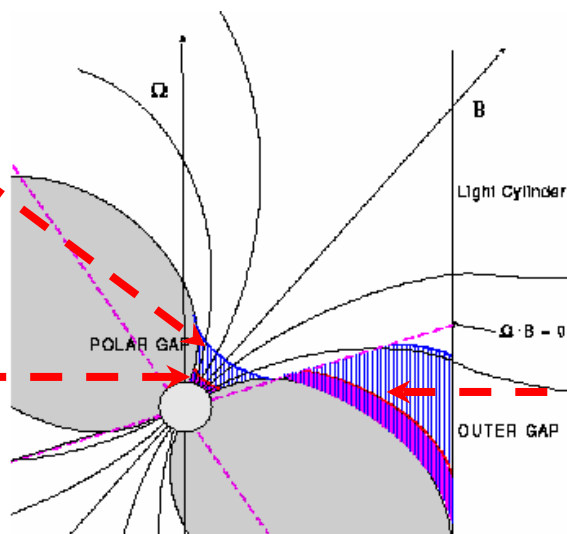
- 几种磁层粒子加速模型 (即偏离 ρ_{GJ} 的方式)



SCLF模型



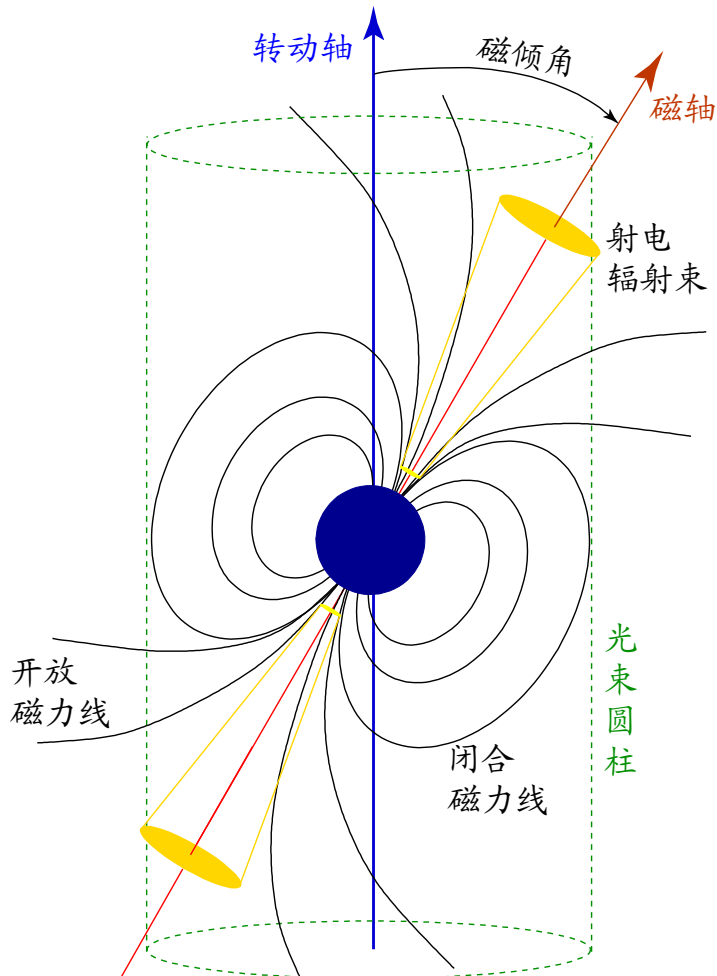
RS75模型



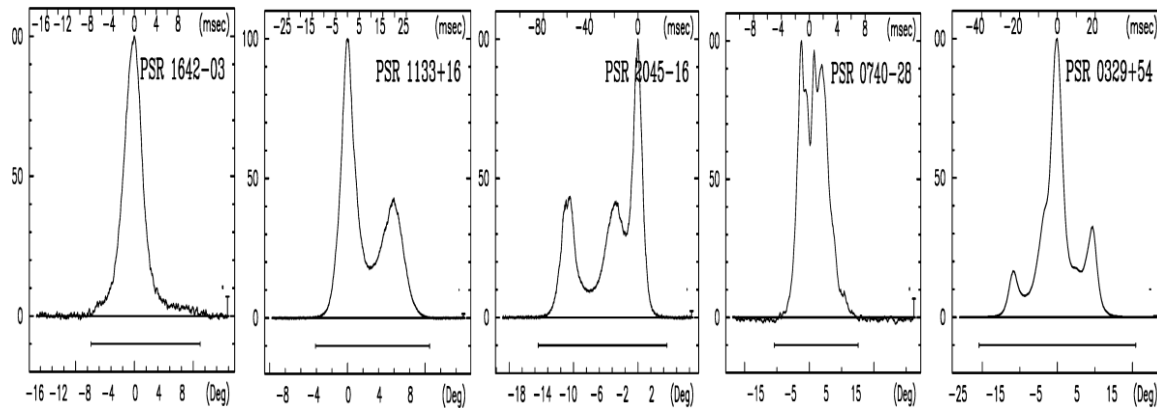
CHR86模型

6, 转动供能脉冲星

辐射轮廓与唯象模型:



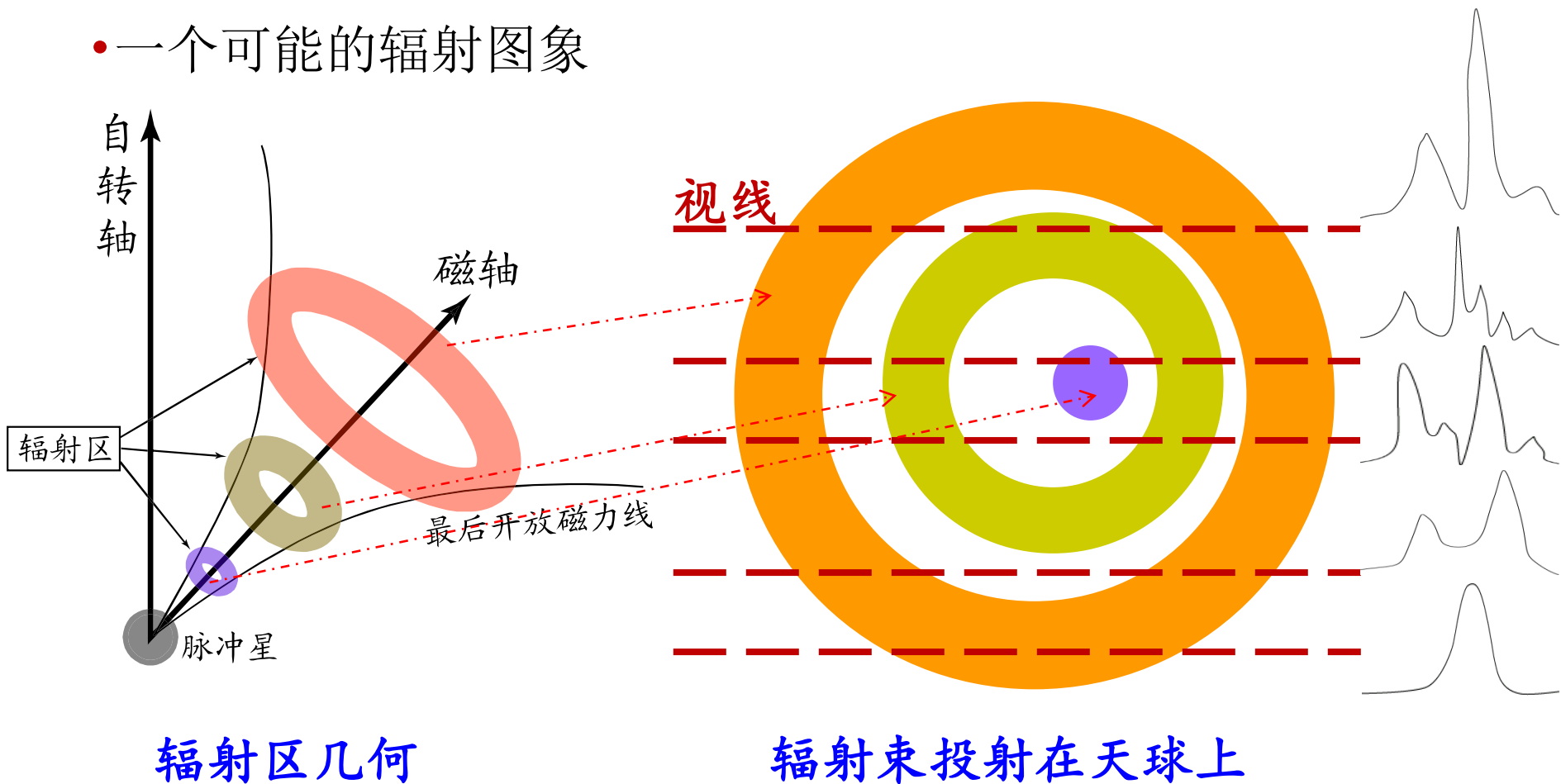
脉冲轮廓可以具有一到五个数目不等的峰；个别脉冲星辐射轮廓中峰的数目可能更多。



6, 转动供能脉冲星

辐射轮廓与唯象模型:

- 一个可能的辐射图象



总 结

- 0, 为什么要研究脉冲星?
- 1, 脉冲星类天体的观测表现
- 2, 脉冲星类天体的形成
- 3, 质量-半径关系的计算
- 4, 中子星的结构
- 5, 奇异夸克星的结构
- 6, 转动供能脉冲星

作业

习题： 2、3