

# 《脉冲星天文学》

暑期讲习班

## PA2. Neutron stars

---

讲授：徐仁新

北京大学物理学院天文学系

有这样一种传说...

\*\*\*\*指令

北大：为什么要开展这项工作？

清华：如何开展并创造性地完成这项工作...

那么，

为什么要研究中子星？

?

因为它们是天上的东西，天文学家就要研究。

中子星是恒星演化的“舍利子”，研究它将加深宇宙认识。

为了更好地导航、时间标准等脉冲星应用，所以要研究。

出于好奇，我就是想明白中子星“肚子”里面是什么。

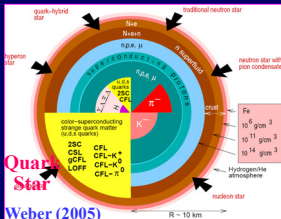
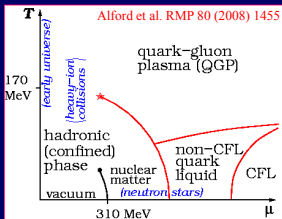
# 一个理由：认识QCD!

*Non-perturbative QCD* is related to one of the seven **Millennium Prize Problems**

By The Clay Mathematics Institute

Paris, May 24, 2000

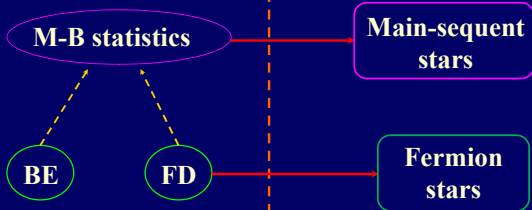
- P versus NP
- The Hodge conjecture
- The Poincaré conjecture (*solved*)
- The Riemann hypothesis
- **Yang-Mills existence and mass gap**
- Navier-Stokes existence and smoothness
- The Birch and Swinnerton-Dyer conjecture



# 1, 相关研究历史

**Statistical Laws**

**EoS of Stars**



理解**天体**现象依赖**地面**实验室物理定律!

# 1, 相关研究历史

## 天文观测提出问题: 白矮星之谜

- 1862年: 据Kepler定律推测天狼B星质量为 $(0.75\sim 0.95)M_{\odot}$   
然而其光度只有 $\sim 1/360 L_{\odot}$ !
- 1914年: Adams测量光谱, 得天狼B星半径 $\sim 0.03 R_{\odot}$
- 1925年: Adams测量天狼B星光谱红移, 得非常大的 $M/R$ 比!
- 1926年: Eddington出版 “*The Internal Constitution of the Stars*”

## 理论物理研究的进展: 量子统计

- Fermi, E. 1926, Rend. Acc. Lincei, 3, 145
- Dirac, P. 1926, Proc. Roy. Soc., 112, 661
- Fowler, R. H. 1926, MNRAS, 87, 114
- Chandrasekhar, S. 1931, ApJ, 74, 81: **相对论EoS、WD结构**

# 1, 相关研究历史

## 故事并未结束：超过Chandrasekhar质量？

- 1932年：Chadwick发现确实存在“中子”的迹象
- 1932年：Landau就推测一种主要由中子构成的星体
- 1934年：Baade和Zwicky指出中子星可能在超新星爆发时产生
- 1939年：Oppenheimer和Volkoff计算发现： $M_{\max} \sim M_{\odot}$ ， $R \sim 10\text{km}$
- 1968年：Bell和Hewish等发现“脉冲星”
- 1968年：Gold提出“脉冲星 = 旋转磁化中子星”

# 1, 相关研究历史

## 另类Fermi子星：中子星还是夸克星？

- 1969年：Ivanenko和Kurdgelaidze猜测中子星内部有**夸克物质**
- 1970年：Itoh计算了由自由 $\{u, d, s\}$ 组成天体的流体静力学平衡
- 1971年：Bodmer探讨奇异夸克物质于中子星内部的可能性
- 1973年：Gross、Wilczek、Politzer证明**渐近自由**
- 1984年：**Witten猜想**奇异物质可能是强子的真正基态
- 1986年：Haensel等和Alcock等：**脉冲星是奇异星而非中子星？**

## 2, 质量-半径关系的计算

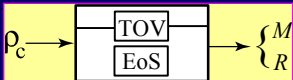
为何要关心质量-半径关系?

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



# 2, 质量-半径关系的计算

## 质量-半径关系计算一例:

Li et al. 1999

• 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:

$$M \propto R^3$$

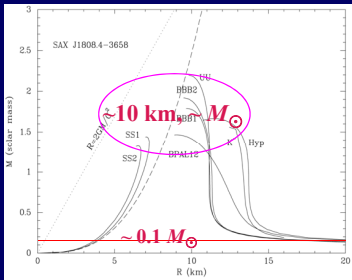
• 小质量夸克星:

$$M \propto R^3$$

• 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



# 3, 中子星的结构

整体结构: 由外向内

简并电子气中的 $\beta$ -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

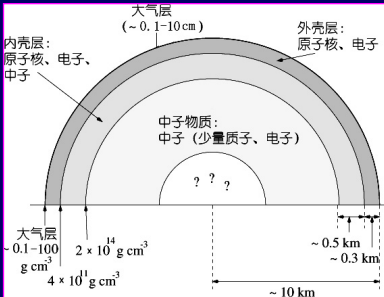
钉扎过程: glitch?

## • 中子物质区

超流n、超导p

## • 中子星的核

夸克物质相?



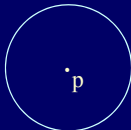
# 3, 中子星的结构

## 强磁场中子星表层物质:

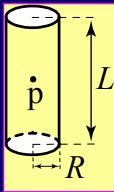
### •何时磁场足够强?

$$\left. \begin{array}{l} \text{Coulomb能} \sim e^2/a_B \\ \text{电子回旋能} \sim eB/(mc) \end{array} \right\}$$

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



$B = 0$



$B \neq 0$

### •电子云“柱”对称分布

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

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

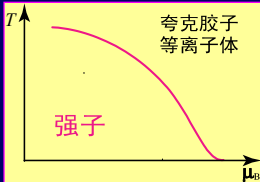
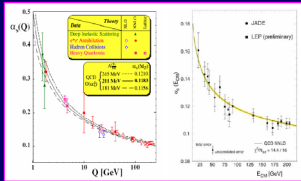
### •分子链

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

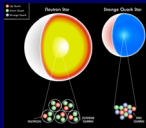
要将其中一个原子从分子链中断开需要作功 → 粘合能

# 4, 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! 由几乎等量的自由u、d、s等夸克组成
- **奇异(夸克)星:** 奇异夸克物质组成星体 粲夸克星? ( $\rho > 10^{17} \sim 10^{18} \text{ g/cm}^3$ )



# 4, 奇异夸克星的结构

## 奇异星电子分布:

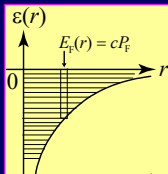
- $N_s$  略小:  $m_s (\sim 200\text{MeV}) > m_u (2-8\text{MeV})$  或  $m_d (5-15\text{MeV})$
- 为了保持整体电中性, 奇异夸克物质含有 **少量电子** ( $10^{-4}$ 倍)
- **夸克**: 强作用和电磁作用; **电子**: 电磁作用  
在夸克表面电子的分布比夸克弥散  $\Rightarrow$  夸克表面存在 **强电场**
- **Thomas-Fermi模型** 计算奇异夸克物质表面的强电场 (ER):

$$\varepsilon(r) = cP_F(r) - e\phi(r) = \text{常数} = 0$$



$$E = -\frac{dV}{dz} = \frac{7.2 \times 10^{18}}{(1.2z_{11} + 4)^2} \text{ V/cm}, \quad z > 0$$

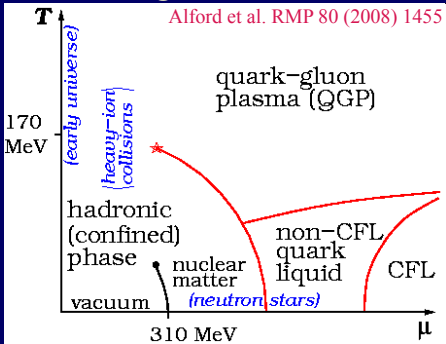
在  $z_{11} = z/(10^{-11}\text{cm}) = 0$  时,  $E \sim 5 \times 10^{17} \text{ V/cm}$



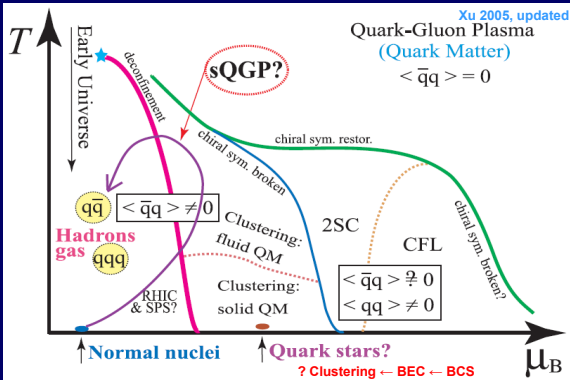
# 5, 脉冲星物态: 固态夸克物质?

• A conjectured diagram with **Color-superc.**

BCS-like  
super-  
conductor



# • Another conjectured diagram ...



## 5, 脉冲星物态: 固态夸克物质?

• 存在**夸克集团相**相对于理解脉冲星有何帮助?

➤ A **stiffer** EoS  $\Rightarrow$  higher maximum mass

$M(4U\ 1636-536) \sim 2M_{\text{sun}}? \dots$

➤ To render the quark matter **solidified**

pulsar glitch, precession, Planckian spectrum

➤ Extra energy released during **star-quake**


SGR-giant flare  $\sim 10^{47}$  erg, AXP burst/glitch

➤ **Ferro-magnetism** phase transition?

What's the origin of pulsar strong B-field?



# Neutron stars *vs.* Quark stars

	Phenomena observed	Normal neutron stars	(Solid) quark stars	Note
Radio pulsars:	magnetospheric emission	ok?	ok?	$e^\pm$ plasma
	glitch	vortex (un)pinning	star-quake	to be checked
	slow glitch	???	in low-mass QS	no NS model
	 drifting subpulses	binding?	binding!	surface condition
	(free) precession	damped?	no damping!	rigid or not
	timing noise	high in msPSR?	low-mass QS	random torque
AXPs/SGRs*:	energy	B-field	gravity & strain	magnetar?
	burst with glitch $\sim 10^{-6}$	?	AISq*	sometimes
	super-flare	high-B magnetar?	giant-quake?	
CCOs*:	age discrepancy	?	QS with fossil disk	
	erratic timing	?	torqued by disk	
DTNs*:	non-atomic feature	high B & Z?	bare QS!	
<i>Thermal radius</i>	why small?	polar cap?	low-mass QS	
APXPs*:	ADmsXPs*	ok?	low-mass QS?	spin down & up
XRBs*:	burst	nuclear power	crusted QS?	
Sub-msPSRs*:	super-Kepler spin	no!	possible	prediction (QS)
Others:	supernova	$\nu$ -driven??	$\gamma$ -driven?	not successful
	MACHOs*?	?	(low-mass) QS?	
	UHECRs*?	?	strangelets?	

\*AXPs/SGRs: anomalous X-ray pulsars/soft  $\gamma$ -ray repeaters, CCOs: compact central objects, DTNs: dim thermal "neutron stars", APXPs: accretion-powered X-ray pulsars, XRBs: X-ray bursts, Sub-msPSRs: sub-millisecond pulsars, MACHOs: massive compact halo objects, UHECRs: ultra-high energy cosmic rays, AISq: accretion-induced star-quake.

# 总 结

1. 脉冲星/中子星的物态研究本质上涉及QCD的非微扰行为，而后者却正在挑战着当今粒子物理领域的学者们。
2. 所有脉冲星模型可分为两大类：中子星和夸克星；肯定或否定其中之一都将是激动人心的、里程碑式的进展！
3. 尽管有一些现象可能表明夸克星的存在，但问题是：

**如何找到一个干净的、模型无关的证据？**