

《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。

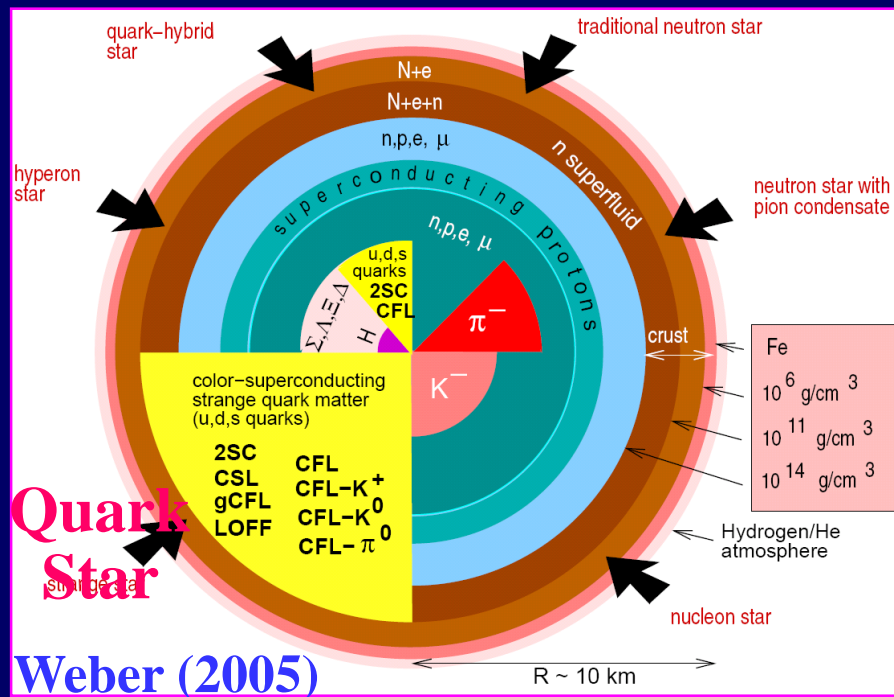
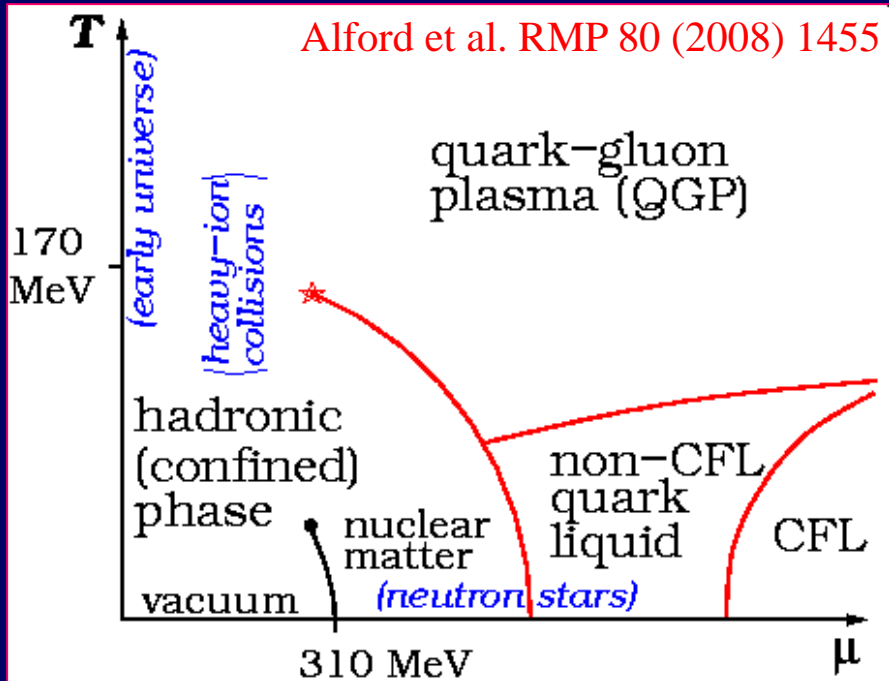
一个理由：认识QCD!

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

By The Clay Mathematics Institute

Paris, May 24, 2000

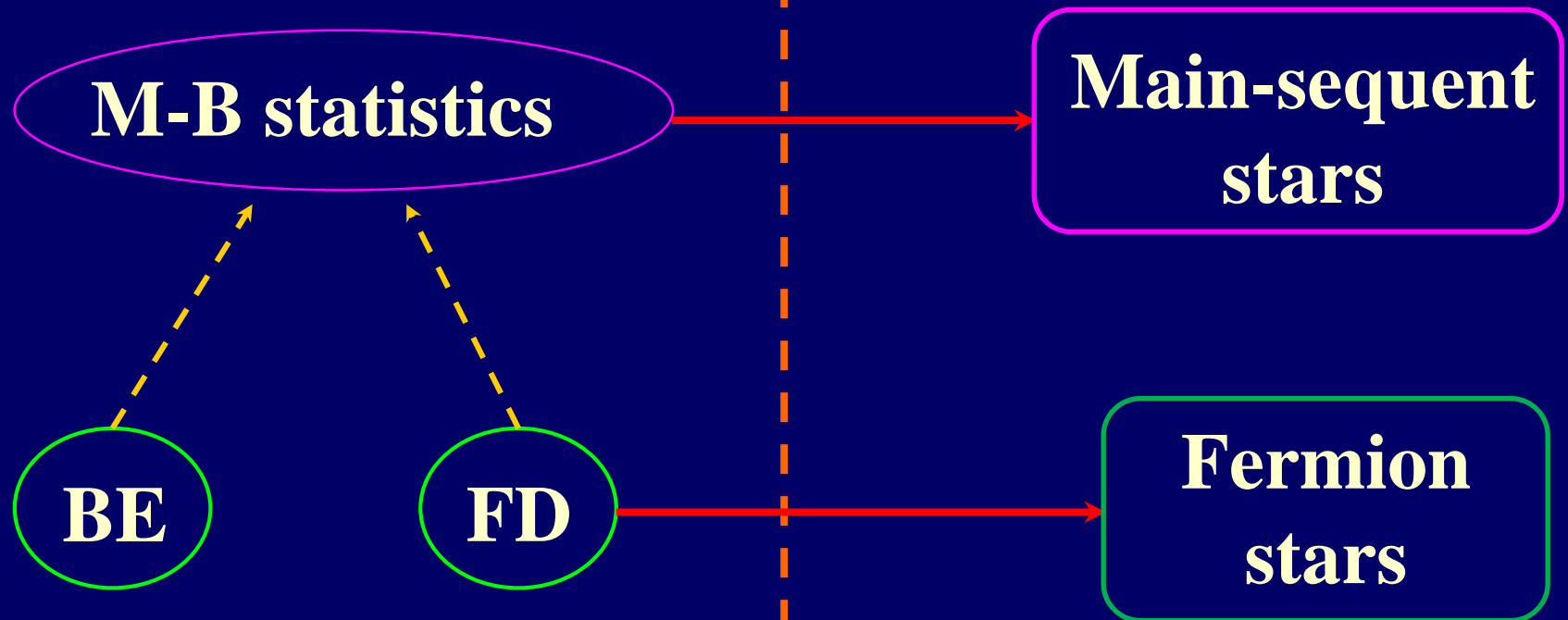
- P versus NP
- The Hodge conjecture
- The Poincaré conjecture (*solved*)
- The Riemann hypothesis
- **Yang-Mills existence and mass gap**
- Navier-Stokes existence and smoothness
- The Birch and Swinnerton-Dyer conjecture



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

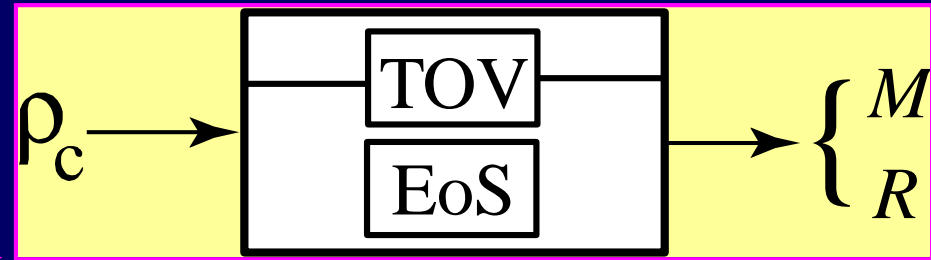
为何要关心质量-半径关系?

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

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:

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

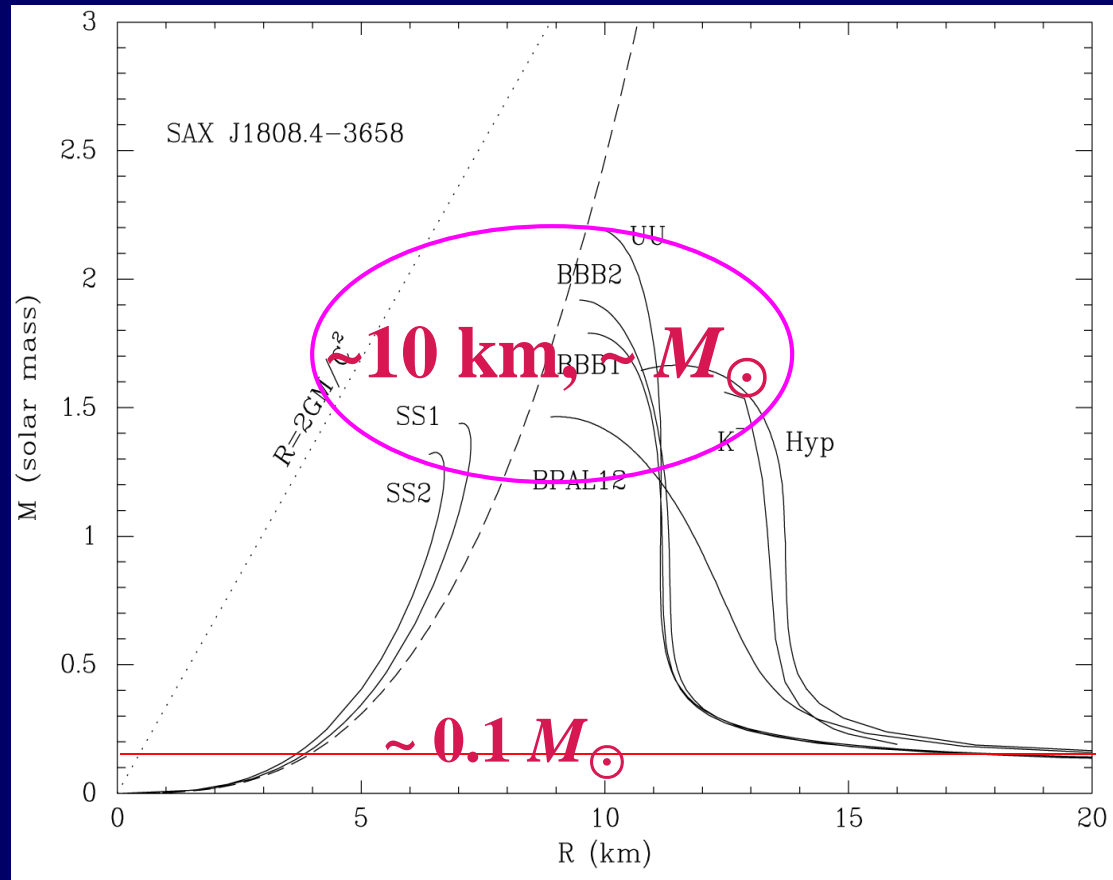
- 小质量夸克星:

$$M \propto R^3$$

- 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 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

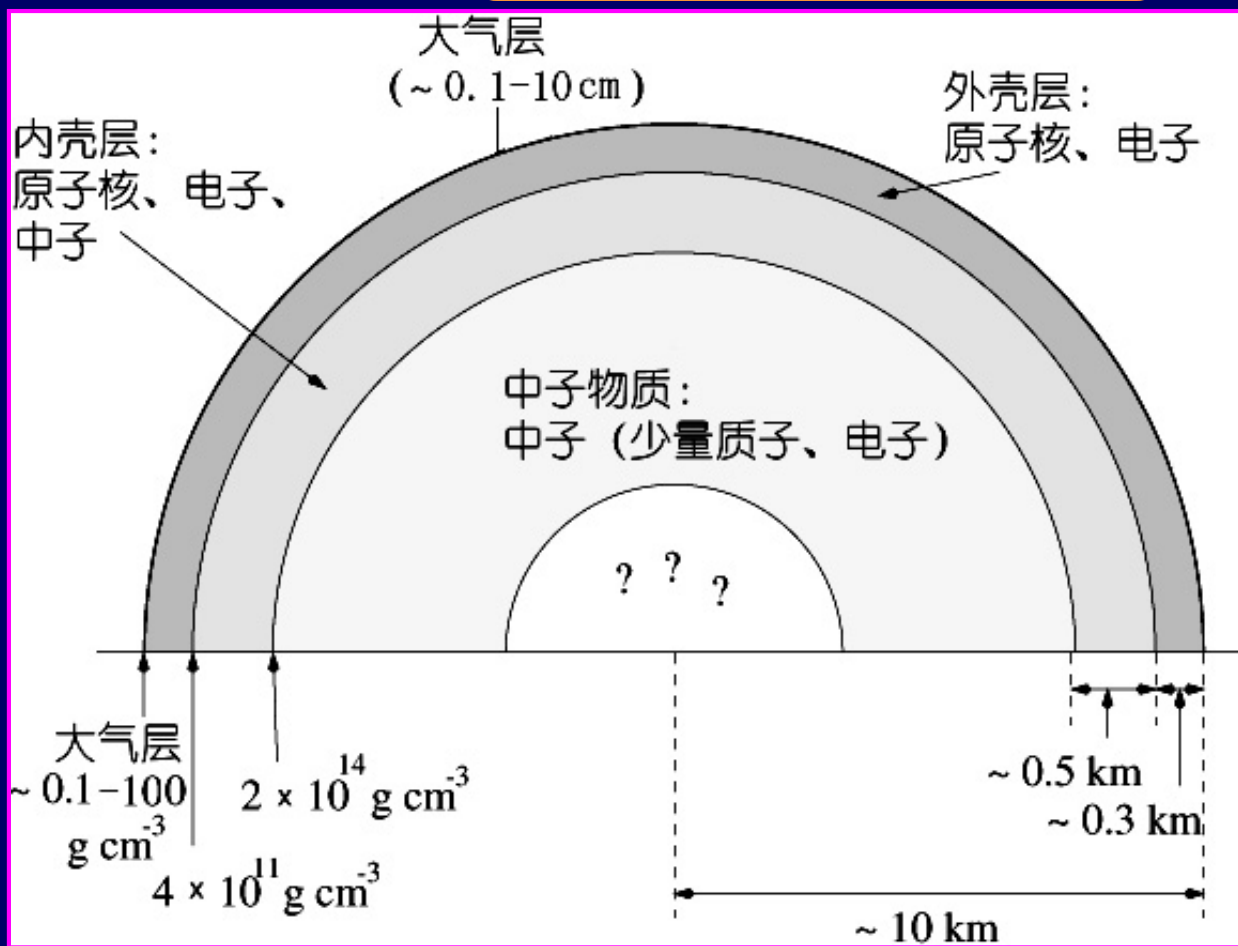
钉扎过程: glitch?

- 中子物质区

超流n、超导p

- 中子星的核

夸克物质相?



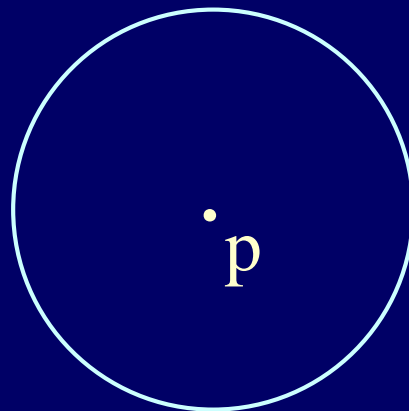
3, 中子星的结构

强磁场中子星表层物质:

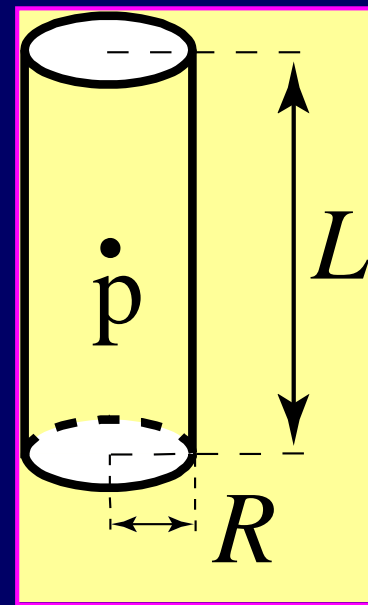
- 何时磁场足够强?

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

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



$B = 0$



$B \neq 0$

- 电子云“柱”对称分布

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

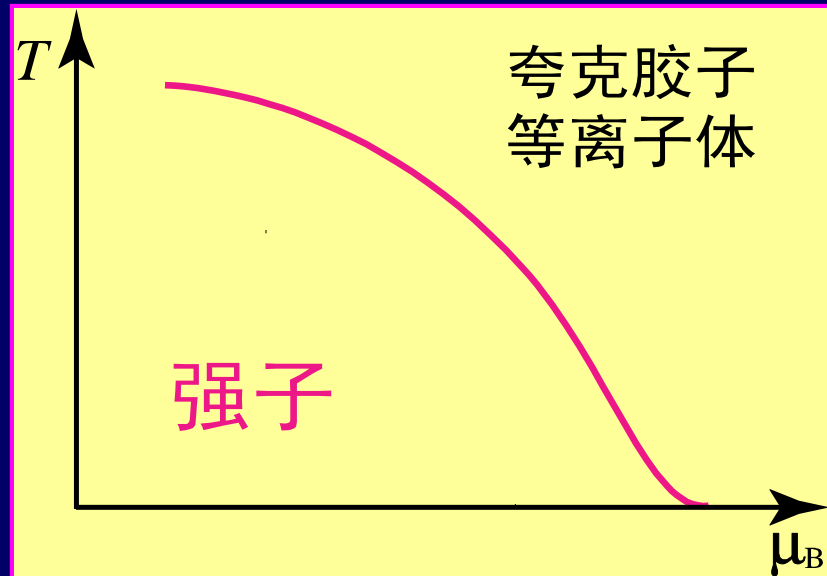
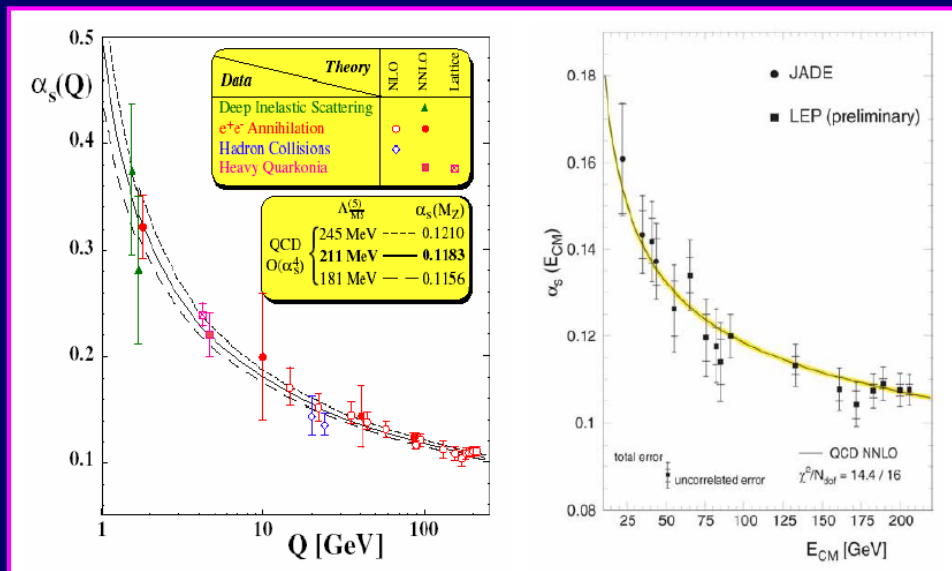
例: $B = 10^{12} \text{ G}$, $|E| = 161 \text{ eV} \gg 13.6 \text{ eV}$ ($B = 0$: $E_n = -13.6/n^2 \text{ eV}$)

- 分子链

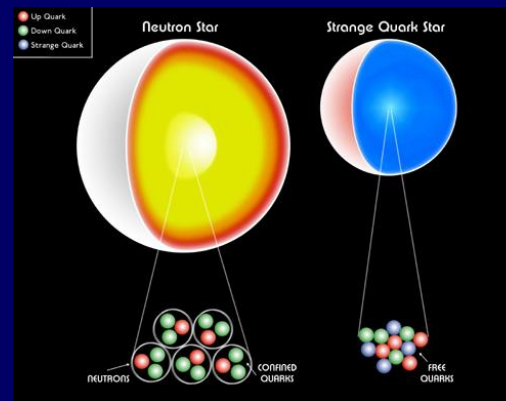
两个分离较远的柱形原子靠在一起时会放出能量! $\text{H}_2, \dots, \text{H}_n$
要将其中一个原子从分子链中打断需要作功 \rightarrow 粘能

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? ($\rho > 10^{17} \sim 10^{18} \text{ g/cm}^3$)

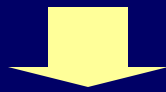


4, 奇异夸克星的结构

奇异星电子分布:

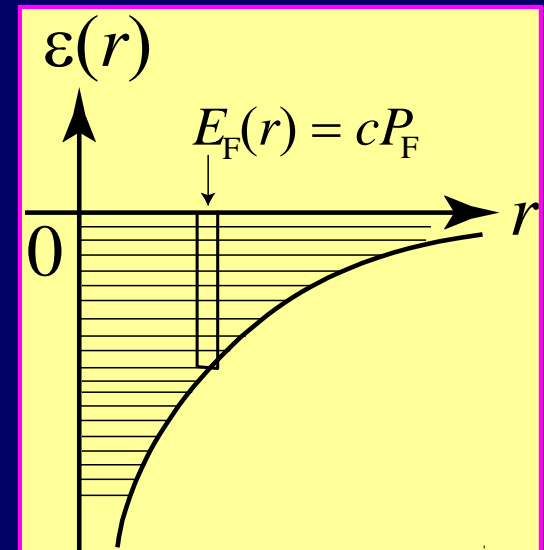
- N_s 略小: $m_s (\sim 200\text{MeV}) > m_u (2-8\text{MeV})$ 或 $m_d (5-15\text{MeV})$
- 为了保持整体电中性, 奇异夸克物质含有少量电子 (10^{-4} 倍)
- 夸克: 强作用和电磁作用; 电子: 电磁作用
在夸克表面电子的分布比夸克弥散 \Rightarrow 夸克表面存在强电场
- **Thomas-Fermi模型** 计算奇异夸克物质表面的强电场 (ER):

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



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

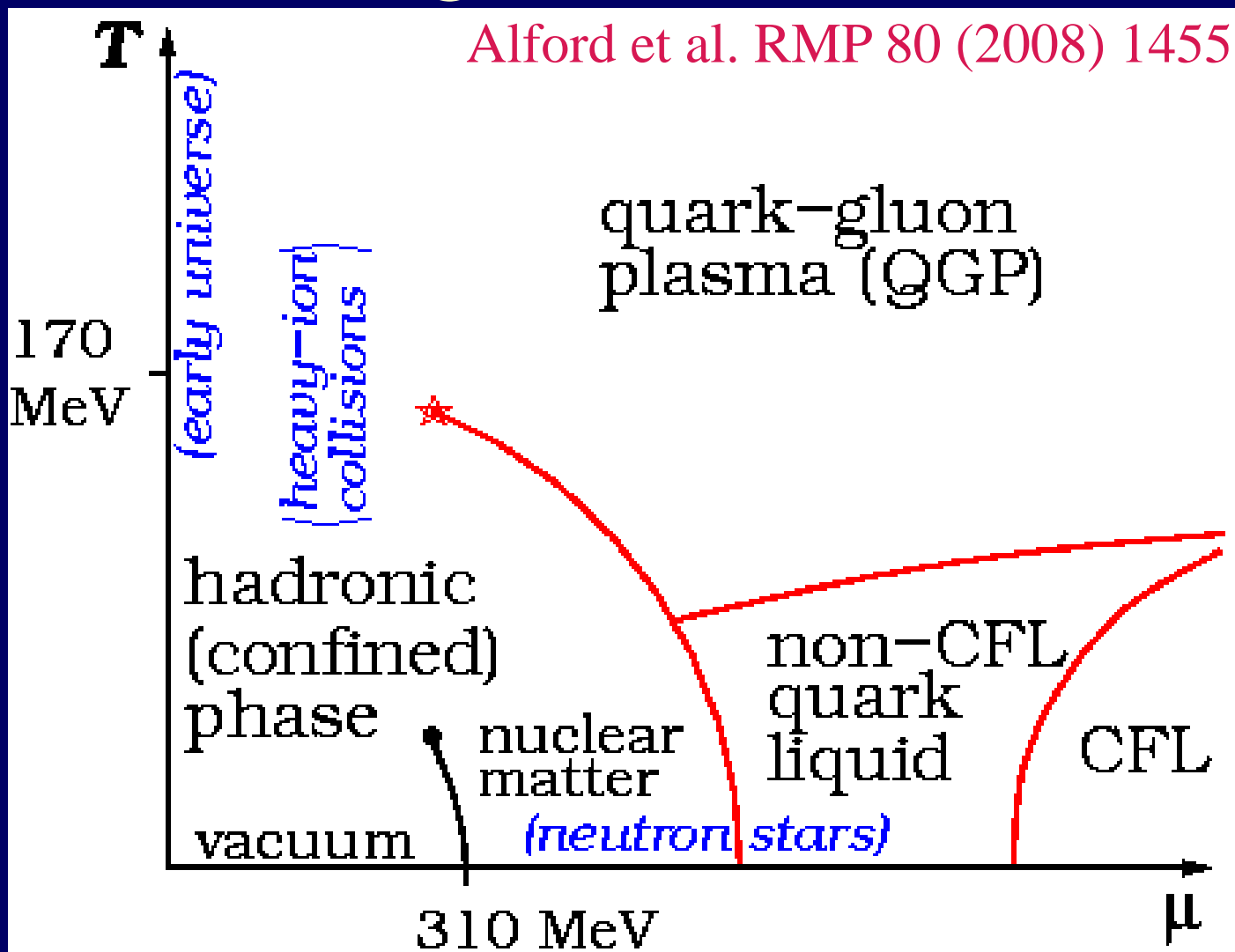
在 $z_{11} = z/(10^{-11}\text{cm}) = 0$ 时, $E \sim 5 \times 10^{17} \text{ V/cm}$



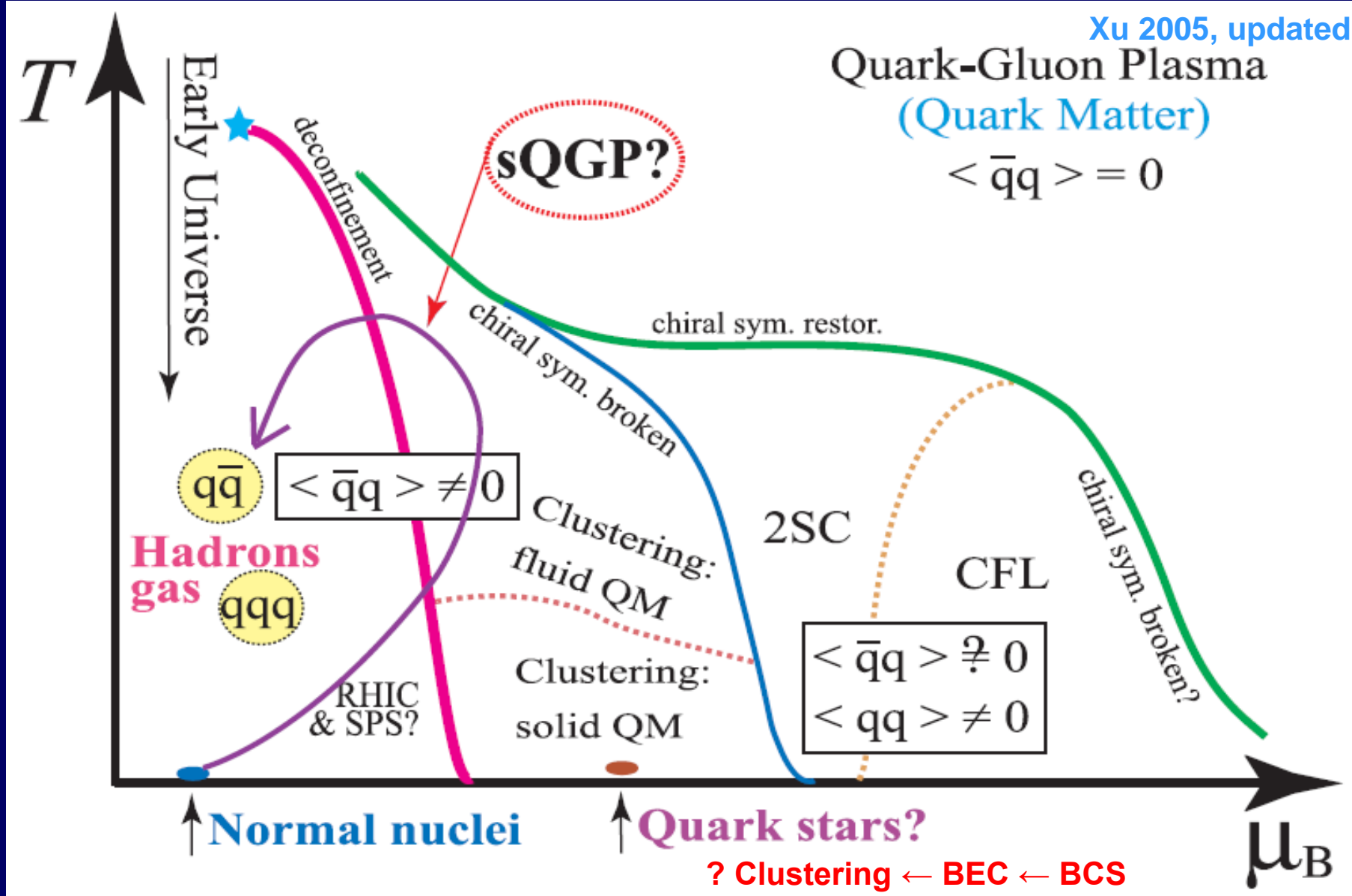
5, 脉冲星物态: 固态夸克物质?

- 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	ν -driven??	γ -driven?	not successful
	MACHOs*?	?	(low-mass) QS?	
	UHECRs*?	?	strangelets?	

*AXPs/SGRs: anomalous X-ray pulsars/soft γ -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？