

# 中子星内重子超流能隙的研究

---

台长春人造卫星观测站

许 妍  
中科院国家天文

# 主要内容:

一 中子星内核子 $^1S_0$ 超流能隙的研究

二 中子星内 $\Lambda$ 超子 $^1S_0$ 超流能隙的研究

# 简介

在研究中子星相关的天文现象时，比如星体热演化、冷却过程、旋转动力学性质、脉冲星干扰等，都会考虑到重子超流的影响。特别的，中子星的中微子辐射率敏感的依赖于重子超流能隙的大小。普遍认为中子星核心区域较快的中微子辐射过程是核子、超子直接Urca过程，而重子超流可以明显的抑制其中微子辐射率和热容量。因此对中子星内重子超流现象的研究是核天体物理领域的热点课题。

在中子星内壳层，中子会形成 $^1S_0$ 对。在中子星核心，质子、 $\Lambda$ 超子会形成 $^1S_0$ 对，中子会形成 $^3P_2$ 对。即：中子、质子、 $\Lambda$ 超子（可能出现的其它重子）在吸引相互作用下产生库伯对，使得中子、质子、 $\Lambda$ 超子在中子星内部处于超流态。

关于重子超流能隙的大小已有许多理论计算，结果表明不同方法得到 $^1S_0$ 对存在的密度范围均相似。而想要获得对能隙精确的大小，并且给出重子超流对一颗中子星定量的影响还很困难。这主要是因为中子星物质中BB相互作用存在诸多不确定性，比如：所采取的近似方法、极端条件下获得的间接观测数据等等。

2014. 10. 30—2014. 10. 31 吉林大学

# 一、中子星内核子 $^1S_0$ 超流能隙的研究

相对论平均场理论 (RMFT) 在描述核物质和有限核方面取得了极大的成功。标准的RMFT包含同位旋标量-标量介子 $\sigma$ ，同位旋标量-矢量介子 $\omega$ ，同位旋矢量-矢量介子 $\rho$ 。其中，标量介子 $\sigma$ 提供强子间的吸引作用，矢量介子 $\omega$ 提供短程排斥作用，同位旋矢量-矢量介子 $\rho$ 描述质子和中子的区别。而同位旋矢量-标量介子 $\delta$ 通常不被考虑。然而，近年来许多学者的研究均表明， $\delta$ 介子对中子星物质有明确的贡献，会改变中子星物质EOS，从而改变中子星物质整体性质，比如会改变核子有效质量、粒子含量、费米动量、单粒子能等物理量，而这些量都会影响核子超流能隙的大小。

中子星内只包含 $npe\mu$ 物质情况下，计算中子、质子 $^1S_0$ 能隙大小和出现的密度范围，并且进一步给出 $\delta$ 介子对它们的影响。采用RMF理论来描述中子星内粒子间相互作用，采用BCS理论来求解核子的能隙方程。BCS理论是Bardeen, Cooper和Schrieffer提出的金属超导理论可以应用于原子核理论中。

Phys.Lett.B.1997 399 191;  
Phys.Rev.C.2002 65 045201;  
Phys.Rev.C.2004 70 058801.

2014.10.30—2014.10.31 吉林大学

# 1、理论模型

## 采用RMFT（包含 $\sigma$ 、 $\omega$ 、 $\rho$ 、 $\delta$ 介子）来描述重子间相互作用

RMFT为相对论核多体的研究提供了基本的理论框架。这一理论的基本思想是把核子当做满足狄拉克方程的相对论粒子，而等效的二体力则被相应的等效介子场代替。（等效介子场指在体系的拉氏量中出现的各种介子质量和各种耦合常数均当做自由参数处理，待用实验值或某些成熟的理论结果确定了这些参数后，它们就成了不变的值。）在RMF模型下，介子场被看作经典场，场算符被其期待值代替。

$$\begin{aligned} L = & \sum_B \bar{\psi}_B [i\gamma_\mu \partial^\mu - (M_B - g_{\delta B} \tau \cdot \delta - g_{\sigma B} \sigma) \\ & - g_{\omega B} \gamma_\mu \omega^\mu - g_{\rho B} \gamma_\mu \tau \cdot \rho^\mu] \psi_B \\ & + \frac{1}{2} (\partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - m_\sigma^2 \sigma^2) - U(\sigma) + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_\mu \omega^\mu \\ & + \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho_\mu \rho^\mu + \frac{1}{2} (\partial_\mu \delta \partial^\mu \delta - m_\delta^2 \delta^2) \\ & - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \frac{1}{4} G_{\mu\nu} G^{\mu\nu} + \sum_l \bar{\psi}_l [i\gamma_\mu \partial^\mu - m_l] \psi_l, \end{aligned} \quad (1)$$



$$\begin{aligned} \sum_B \frac{g_{\sigma B}}{\pi^2} \int_0^{p_B} dk k^2 \frac{m_B^*}{\sqrt{k^2 + m_B^{*2}}} &= m_\sigma^2 \sigma + a\sigma^2 + b\sigma^3, \\ \sum_B g_{\omega B} \rho_B &= m_\omega^2 \omega_0 + c_3 \omega_0^3, \\ \sum_B g_{\rho B} I_{3B} \rho_B &= m_\rho^2 \rho_0, \\ \sum_B \frac{g_{\delta B} I_{3B}}{\pi^2} \int_0^{p_B} dk k^2 \frac{m_B^*}{\sqrt{k^2 + m_B^{*2}}} &= m_\delta^2 \delta_0. \end{aligned}$$

# 1、理论模型

可以得到一系列物理量:

重子密度: 
$$\rho_B = \frac{p_B^3}{3\pi^2}$$

重子有效质量: 
$$m_B^* = m_B - g_{\sigma B}\sigma_0 - I_{3B}g_{\delta B}\delta_0 \quad \Rightarrow \quad m_n^* - m_p^* = g_{\delta B}\delta_0.$$

重子单粒子能: 
$$E(k) = \sqrt{k^2 + m_N^{*2}} + g_{\omega N}\omega + g_{\rho N}\rho I_{3N}.$$

**Table 1.** Parameter sets:  $f_i = (g_i/m_i)^2$  (fm<sup>2</sup>),  $i = \sigma, \omega, \rho, \delta$ ,  $A = a/g_\sigma^3$  (fm<sup>-1</sup>), and  $B = b/g_\sigma^4$ .

Parameter	$f_\sigma$	$f_\omega$	$f_\rho$	$f_\delta$	$A$	$B$
Set I	10.33	5.42	0.95	0.00	0.033	-0.0048
Set II	10.33	5.42	3.15	2.50	0.033	-0.0048

# 1、理论模型

采用BCS理论来计算核子 $^1S_0$ 对能隙

能隙方程:

$$\Delta(k) = -\frac{1}{4\pi^2} \int k'^2 dk' \frac{V(k, k') \Delta(k')}{\sqrt{\varepsilon^2(k') + \Delta^2(k')}},$$

$V(k, k')$  为NN势矩阵元:

$$V(k, k') = \langle k | V(^1S_0) | k' \rangle = 4\pi \int r^2 dr j_0(kr) V_{NN}(r) j_0(k' r),$$

# 1、理论模型

这里，我们以RSC势为例来说明 $\delta$ 介子对核子 $^1S_0$ 对能隙的影响

$V(k, k')$  在坐标空间表示为 $V_{NN}(r)$ ：

$$V_{NN}(r; \rho, \alpha, \beta, \gamma) = \sum_{i=1}^5 c_i(\rho, \alpha, \beta, \gamma) e^{-(r/\lambda_i)^2}.$$

the RSC potential is expressed in the five-range Gaussian ( $c_i$ ), and depends on the two nucleon state  $\beta$  and  $\gamma$ , the density  $\rho$  and the asymmetry parameter  $\alpha = (\rho_n - \rho_p) / \rho$ .

Prog.Theor.Phys.1991 86 853;  
Nucl.Phys.A.1971 168 273;  
Nucl.Phys.A.1985 437 487;  
Nucl.Phys.A. 1993 555 128.

2014. 10. 30—2014. 10. 31 吉林大学



## 2、数值结果

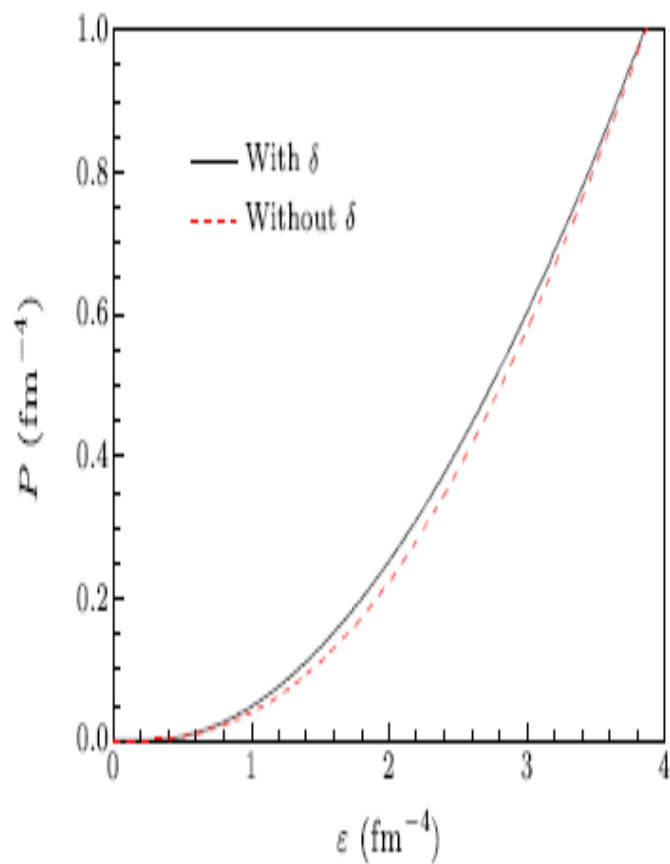


Fig. 1. Pressure  $P$  as a function of energy density  $\varepsilon$ (EOS) with and without including the  $\delta$  meson.

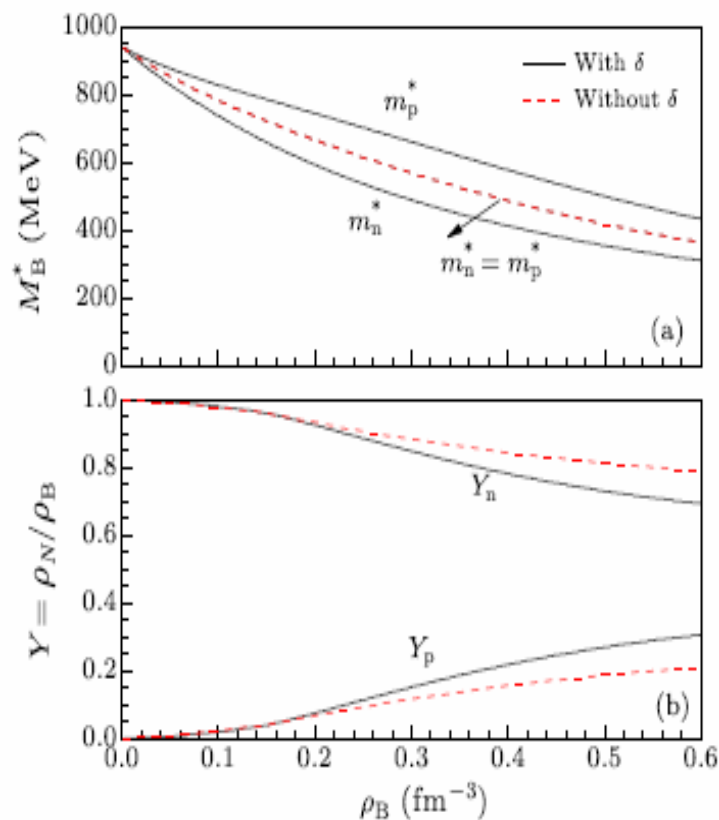


Fig. 2. The effective mass (a) and particle fraction (b) of neutrons and protons as a function of the baryon density  $\rho_B$  with and without including the  $\delta$  meson.

## 2、数值结果

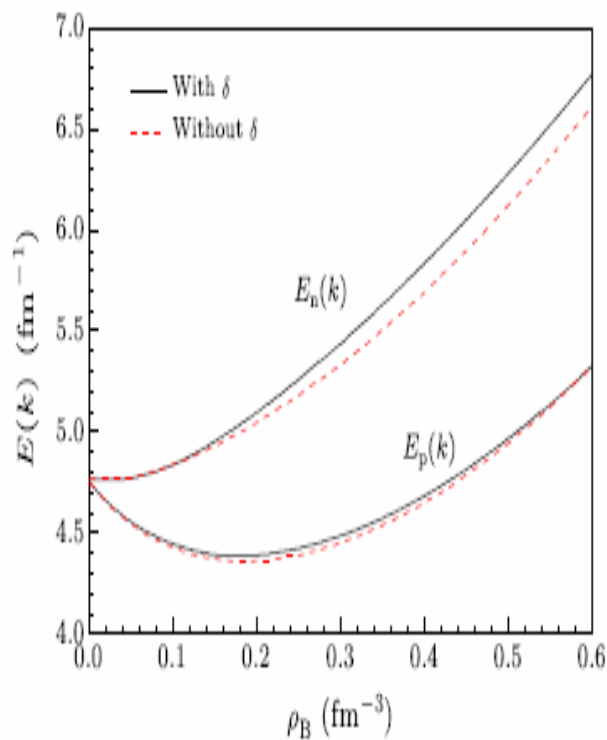


Fig. 3. The single-particle energy  $E_{(k)}$  of nucleons versus the baryon density  $\rho_B$  with and without including the  $\delta$  meson.

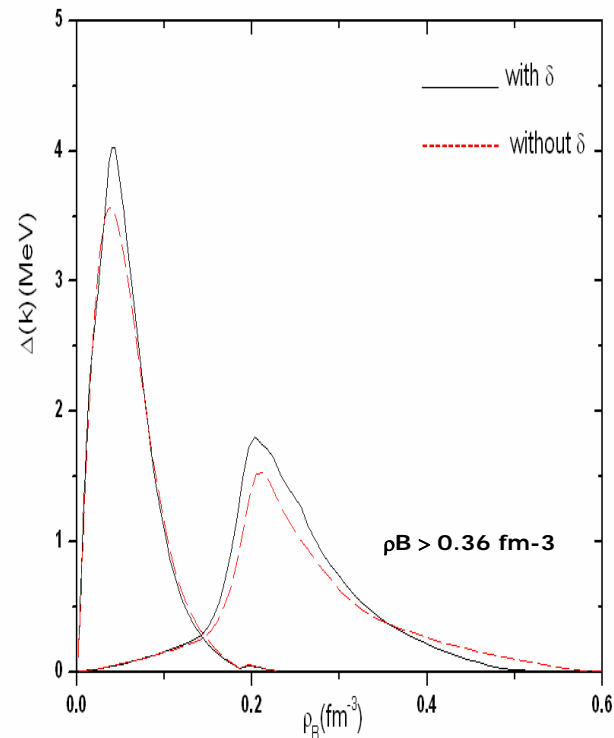


Fig. 4.  $^1S_0$  pairing energy gaps  $\Delta(k)$  of neutrons and protons at the Fermi surface as a function of the baryon density  $\rho_B$  with and without including the  $\delta$  meson.

## 2、数值结果

TABLE II: The peak values of the energy gaps and the critical temperatures for  $^1S_0$  neutrons and protons SF in  $npe\mu$  matter. The critical temperature  $T_c$  of nucleons  $^1S_0$  SF is given by the pairing gap  $\Delta(k)$  at zero temperature approximation,  $T_c \doteq 0.66\Delta(k)(10^{10}\text{K})$ .

	$\Delta_n^{max}(k)$	$T_{cn}^{max}$	$\Delta_p^{max}(k)$	$T_{cp}^{max}$
with $\delta$	4.03	2.66	1.80	1.20
without $\delta$	3.57	2.36	1.53	1.01

Table III. The range of the baryon density  $\rho_B$  and the masses of NSs  $m$  with and without  $\delta$  meson for the Durca processes

Processes	density $\rho_B$	$m=M/M_\odot$
Durca e (with $\delta$ )	$0.275 \leq \rho_B \leq 1.002$	$m \geq 1.043$
Durca $\mu$ (with $\delta$ )	$0.318 \leq \rho_B \leq 1.002$	$m \geq 1.233$
Durca e (without $\delta$ )	$0.342 \leq \rho_B \leq 1.069$	$m \geq 1.118$
Durca $\mu$ (without $\delta$ )	$0.416 \leq \rho_B \leq 1.069$	$m \geq 1.375$

小结:

应用RMFT和BCS理论计算了核子 $^1S_0$ 超流能隙。结果表明中子 $^1S_0$ 超流能隙只出现在低密度区域,仅影响中子星表面冷却性质。质子 $^1S_0$ 超流能隙会出现在较高密度区域,这段密度区域与核子直接Urca过程紧密相关,因而质子超流能隙大小和出现密度范围在中子星冷却过程中扮演至关重要的角色。

我们还研究了 $\delta$ 介子对核子 $^1S_0$ 超流能隙的影响。 $\delta$ 介子出现,使得中子和质子的超流能隙在核子超流出现的中间密度区域均增加。另外,当密度大于 $0.36\text{fm}^{-3}$ ,质子 $^1S_0$ 超流能隙明显小于没有 $\delta$ 介子情况,并且 $\delta$ 介子使得质子 $^1S_0$ 超流出现的密度范围变窄,这将对中子星冷却速度产生非常大的影响。总之, $\delta$ 介子出现不仅影响中子星EOS,而且影响中子星的冷却性质。

## 二、中子星内 $\Lambda$ 超子 $^1S_0$ 超流能隙的研究

### 1、理论模型

引入 $\sigma^*, \phi$  介子的原因

不同模型下的结果均表明在致密星体内部超子的丰度会超过核子的丰度。也就是说，在中子星的核心区域超子会成为主要的粒子种类。所以有必要引入额外的介子  $\sigma^*$  来拟合得到超子-超子相互作用。

它们对拉氏量的贡献如下：

$$L^{YY} = \frac{1}{2}(\partial^\mu \sigma^* \partial_\mu \sigma^* - m_{\sigma^*}^2 \sigma^{*2}) + \frac{1}{2} m_\phi^2 \phi \phi - \frac{1}{4} S^{uv} S_{uv} - \sum_B g_{\sigma^* B} \bar{\Psi}_B \sigma^* \Psi_B - \sum_B g_{\phi B} \bar{\Psi}_B \gamma_u \Psi_B \phi^u$$



$$\sum_B g_{\sigma^* B} \int_0^{k_F} dk k^2 \frac{M_B^*}{\sqrt{k^2 + M_B^{*2}}} = m_{\sigma^*}^2 \sigma^*,$$

$$\sum_B g_{\phi B} \frac{1}{\pi^2} \int_0^{k_F} dk k^2 = m_\phi^2 \phi_0.$$

# 1、理论模型

与标准的RMFT相比引入这两个介子会使一些物理量发生变化：  
超子的有效质量会发生变化，

$$m_B^* = m_B - g_{\sigma B} \sigma - g_{\sigma^* B} \sigma^*$$

超子的化学势会发生变化，

$$\mu_B = \sqrt{k_B^2 + m_B^{*2}} + g_{\omega B} \omega + g_{\phi B} \phi + g_{\rho B} \rho_3^0 I_{3B}$$

能隙方程：

$$\Delta(k) = -\frac{1}{4\pi^2} \int k'^2 dk' \frac{V(k, k') \Delta(k')}{\sqrt{\varepsilon^2(k') + \Delta^2(k')}}$$

在RMFT框架下，单粒子能 $E(k)$ 可以写成：

$$E(k) = \sqrt{k^2 + m_\Lambda^{*2}} + g_{\omega\Lambda} \omega + g_{\phi\Lambda} \phi$$

# 1、理论模型

我们以下面的 $\Lambda\Lambda$ 势为例来计算 $\Lambda$ 超子的超流能隙，其径向分布如下：

$$V(r) = -103.9 \exp(-1.176r^2) + 658.2 \exp(-5.93r^2)$$

在动量空间积分：

$$V(k, k') \equiv \langle k | V(^1S_0) | k' \rangle = 4\pi \int_0^{\infty} r^2 dr j_0(kr) V(r) j_0(k'r)$$

选取参数如下：

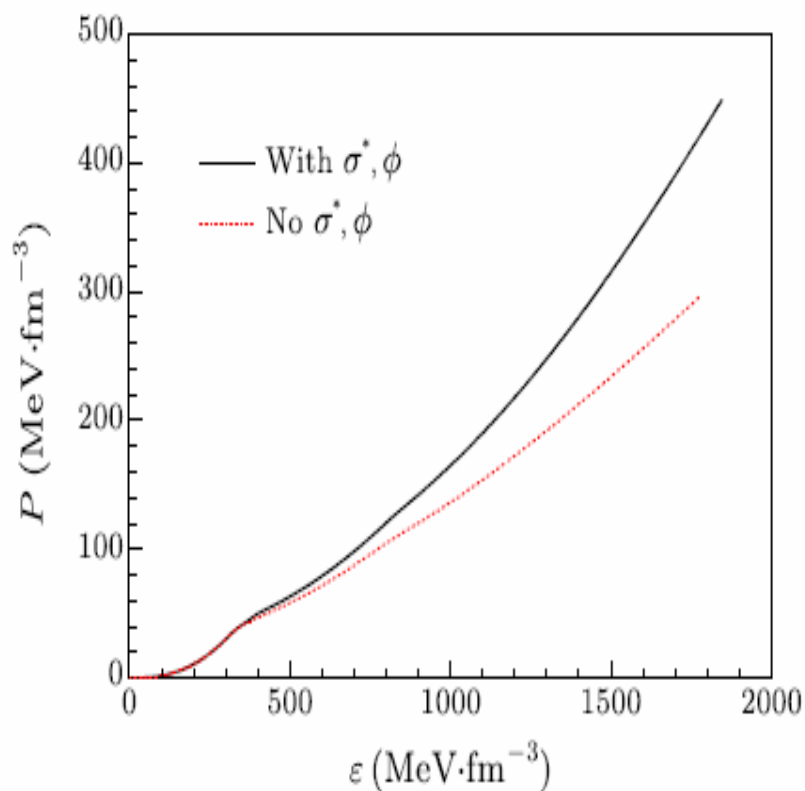
Table 1. The TM1 set. [25]

$g_{\sigma N}$	$g_{\omega N}$	$g_{\rho N}$	$g_2(\text{fm}^{-1})$	$g_3$	$c_3$
10.029	12.614	4.632	7.233	0.618	71.308

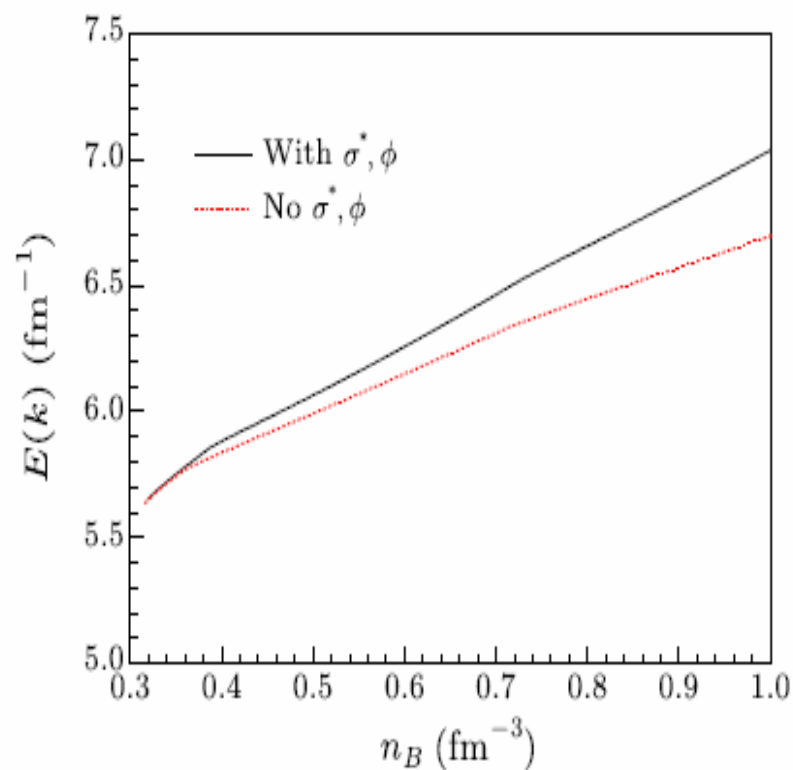
Table 2. The hyperon scalar coupling constants.

	$g_{\sigma\Lambda}$	$g_{\sigma\Sigma}$	$g_{\sigma\Xi}$	$g_{\sigma^*\Lambda}$	$g_{\sigma^*\Sigma}$	$g_{\sigma^*\Xi}$
with $\sigma^*\phi$	6.170	4.472	3.202	5.412	5.412	11.516

## 2、数值结果



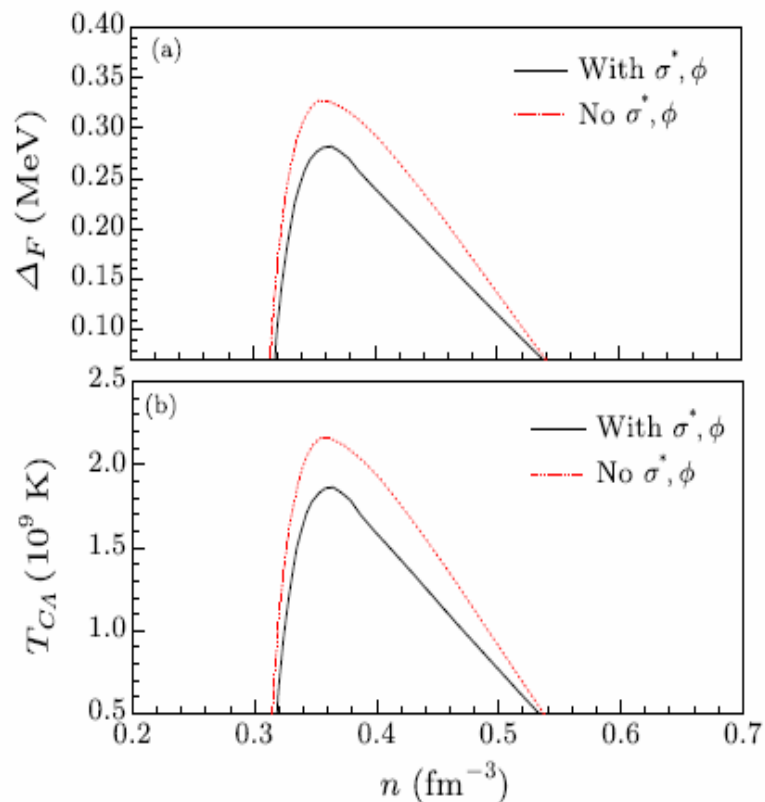
**Fig. 1.** Pressure  $P$  as a function of energy density  $\epsilon$  (EOS) with and without the  $\sigma^*$  and  $\phi$  mesons.



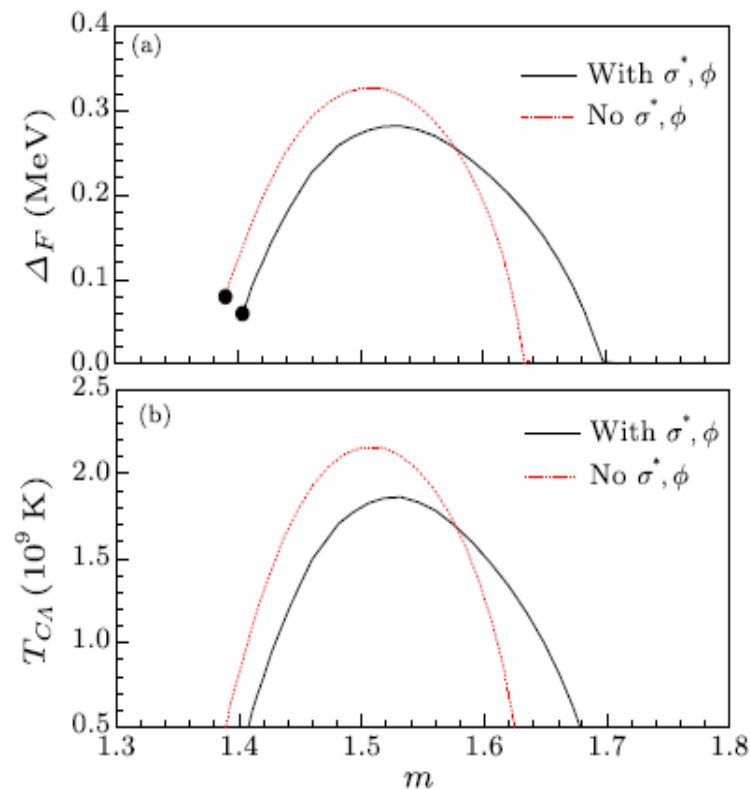
**Fig. 2.** The single-particle energy of  $\Lambda$  hyperon  $E(k)$  as a function of the total baryon density  $n_B$  with and without the  $\sigma^*$  and  $\phi$  mesons.



## 2、数值结果



**Fig. 3.**  $^1S_0$  pairing energy gap of  $\Lambda$  hyperons at the fermi surface  $\Delta_F$  (a) and the critical temperature  $T_{C\Lambda}$  of  $\Lambda$  hyperons  $^1S_0$  SF (b) versus the total baryon density  $n_B$  with and without the  $\sigma^*$  and  $\phi$  mesons.



**Fig. 4.**  $^1S_0$  pairing energy gap of  $\Lambda$  hyperons at the fermi surface  $\Delta_F$  (a) and the critical temperature  $T_{C\Lambda}$  of  $\Lambda$  hyperons  $^1S_0$  SF (b) versus the star  $m = M/M_\odot$  with and without the  $\sigma^*$  and  $\phi$  mesons.

2014. 10. 30—2014. 10. 31 吉林大学

## 小结:

应用RMFT和BCS理论计算了 $\Lambda$ 超子 $^1S_0$ 超流能隙,并考虑了 $\sigma^*$ , $\phi$ 介子对其能隙的影响。结果表明 $\sigma^*$ , $\phi$ 介子的出现使得 $\Lambda$ 超子 $^1S_0$ 超流能隙变小。同时, $\Lambda$ 超子 $^1S_0$ 超流能隙出现的质量范围变大。这些变化必然引起超子直接Urca过程的中微子辐射率和热容量的变化。

请各位老师批评指正!

谢 谢!