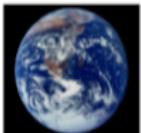


Сверхпроводимость вакуума в сильном магнитном поле

В.В. Брагута

ИФВЭ

5 июня, 2012

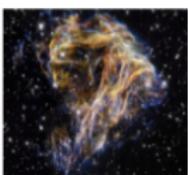


The Earth's magnetic field 0.6 Gauss



A common, hand-held magnet 100 Gauss

The strongest steady magnetic fields achieved so far in the laboratory 4.5×10^5 Gauss



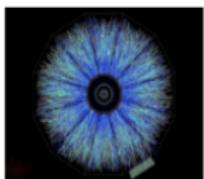
The strongest man-made fields ever achieved, if only briefly 10^7 Gauss

Typical surface, polar magnetic fields of radio pulsars 10^{13} Gauss

Surface field of Magnetars 10^{15} Gauss

<http://solomon.as.utexas.edu/~duncan/magnetar.html>

Slide of D.
Kharzeev

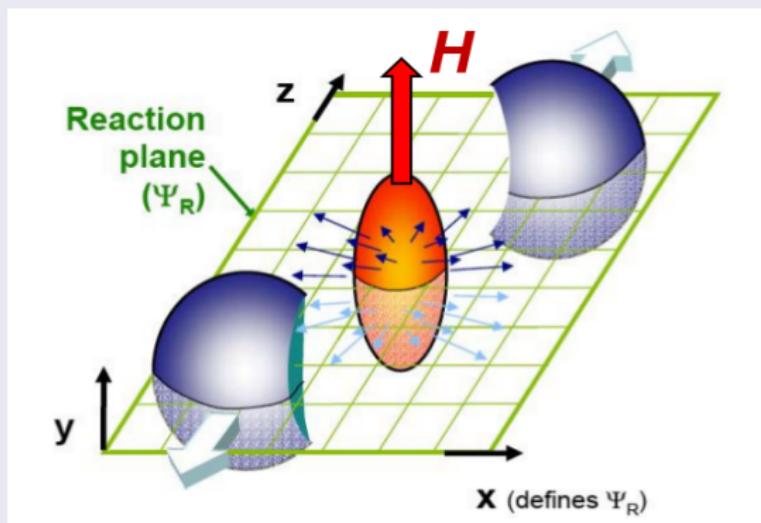


At BNL we beat them all!

Off central Gold-Gold Collisions at 100 GeV per nucleon

$eB(\tau=0.2 \text{ fm}) = 10^3 \sim 10^4 \text{ MeV}^2 \sim 10^{17} \text{ Gauss}$

Нецентральные соударения ионов



$$eH \sim (1 - 15)m_\pi^2$$

В докладе будет рассмотрено статическое и однородное
магнитное поле

Сверхпроводимость вакуума в постоянном магнитном поле (Phys.Rev. D82 (2010) 085011)

- $\epsilon^2(p_z) = p_z^2 + (2n - 2s_z + 1)eH + m^2$
- $M_{\rho^\pm}^2(H) = m_{\rho^\pm}^2 - eH; \quad M_{\pi^\pm}^2(H) = m_{\pi^\pm}^2 + eH;$
- $H_c > \frac{m_{\rho^\pm}^2}{e}, M_{\rho^\pm}^2(H) < 0$ – конденсация ρ^\pm -мезонов

Гиromагнитное отношение для ρ -мезона $g = 2!$

Phys. Rev. 157, 1376 (1967); Nucl. Phys. B216, 373 (1983)...

Эффективный лагранжиан (Phys. Rev. Lett. 95, 012001 (2005))

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \frac{1}{2} \rho_{\mu\nu}^\dagger \rho^{\mu\nu} + m_\rho^2 \rho_\mu^\dagger \rho^\mu - \frac{1}{4} \rho_{\mu\nu}^{(0)} \rho^{(0)\mu\nu} + \frac{m_\rho^2}{2} \rho_\mu^{(0)} \rho^{(0)\mu} + \frac{e}{2g_s} F^{\mu\nu} \rho_{\mu\nu}^{(0)}$$

$$\begin{aligned} F_{\mu\nu} &= \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu, \\ f_{\mu\nu}^{(0)} &= \partial_\mu \rho_\nu^{(0)} - \partial_\nu \rho_\mu^{(0)}, \\ \rho_{\mu\nu}^{(0)} &= f_{\mu\nu}^{(0)} - ig_s(\rho_\mu^\dagger \rho_\nu - \rho_\mu \rho_\nu^\dagger), \\ \rho_{\mu\nu} &= D_\mu \rho_\nu - D_\nu \rho_\mu, \end{aligned}$$

$$D_\mu = \partial_\mu + ig_s \rho_\mu^0 - ie A_\mu, \quad g_s = 5.8$$

Уравнения движения

- $\partial^\nu F_{\nu\mu} = -J_\mu, \quad J_\mu = J_\mu^{\text{ch}} + J_\mu^{(0)}$
 $J_\mu^{\text{ch}} = ie(\rho^{\nu+} \rho_{\nu\mu} - \rho^\nu \rho_{\nu\mu}^+ + \partial^\nu (\rho_\nu^+ \rho_\mu - \rho_\nu \rho_\mu^+)); \quad J_\mu^{(0)} = -\frac{e}{g_s} \partial^\nu f_{\nu\mu}^{(0)}$
- $(\partial^\nu \partial_\nu + m_\rho^2) \rho_\mu^{(0)} - \partial_\mu \partial^\nu \rho_\nu^{(0)} - \frac{g_s}{e} J_\mu^{\text{ch}} = 0$
- $D^\nu \rho_{\nu\mu} + m_\rho^2 \rho_\mu + i(g_s \rho_{\mu\nu}^{(0)} - e F_{\mu\nu}) \rho^\nu = 0$

Конденсация ρ -мезонов в статическом пределе

$$\epsilon_0(\rho_\mu, \rho_\nu^{(0)}) = \frac{1}{2}B_{\text{ext}}^2 + \frac{g_s^2}{4} [i(\rho_\mu^\dagger \rho_\nu - \rho_\nu^\dagger \rho_\mu)]^2 + ieB_{\text{ext}}(\rho_1^\dagger \rho_2 - \rho_2^\dagger \rho_1) + \frac{m_\rho^2}{2} (\rho_\mu^{(0)})^2 + m_\rho^2 \rho_\mu^\dagger \rho_\mu$$

Квадратичная часть

$$\begin{aligned}\epsilon_0^{(2)}(\rho_\mu) &= ieB_{\text{ext}}(\rho_1^\dagger \rho_2 - \rho_2^\dagger \rho_1) + m_\rho^2 \rho_\mu^\dagger \rho_\mu \\ &= \sum_{a,b=1}^2 \rho_a^\dagger \mathcal{M}_{ab} \rho_b + m_\rho^2 (\rho_0^\dagger \rho_0 + \rho_3^\dagger \rho_3).\end{aligned}$$

$$\mathcal{M} = \begin{pmatrix} m_\rho^2 & ieB_{\text{ext}} \\ -ieB_{\text{ext}} & m_\rho^2 \end{pmatrix}$$

$$\mu_\pm^2 = m_\rho^2 \pm eB_{\text{ext}}, \quad \rho_\pm = \frac{1}{\sqrt{2}}(\rho_1 + i\rho_2)$$

$$\epsilon_0(\rho_+, \rho_-) = \frac{1}{2}B_{\text{ext}}^2 + \frac{g_s^2}{2}(|\rho_+|^2 - |\rho_-|^2)^2 + \mu_+^2 |\rho_+|^2 + \mu_-^2 |\rho_-|^2$$

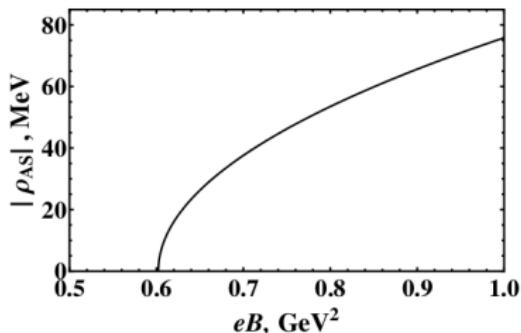
минимум достигается при $\rho_+ = 0; \rho_1 = -i\rho_2 = \rho$

Конденсация ρ -мезонов

$$\epsilon_0(\rho) = \frac{1}{2}B_{\text{ext}}^2 + 2(m_\rho^2 - eB_{\text{ext}})|\rho|^2 + 2g_s^2|\rho|^4$$

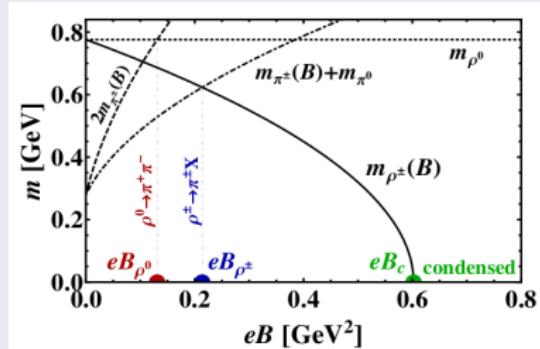
$$|\rho|_0 = \begin{cases} \sqrt{\frac{e(B_{\text{ext}} - B_c)}{2g_s^2}}, & B_{\text{ext}} \geq B_c \\ 0, & B_{\text{ext}} < B_c \end{cases}$$

$$\frac{\epsilon_0(|\rho| = |\rho|_0)}{\epsilon_0(|\rho| = 0)} = \begin{cases} 1 - \frac{e^2}{g_s^2} \left(1 - \frac{B_c}{B_{\text{ext}}}\right)^2, & B_{\text{ext}} \geq B_c \\ 1, & B_{\text{ext}} < B_c \end{cases}$$



Моды распада ρ мезонов

- $\rho^\pm \rightarrow \pi^\pm X, X = \pi^0 > 99\%$
- $\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^- > 99\%$

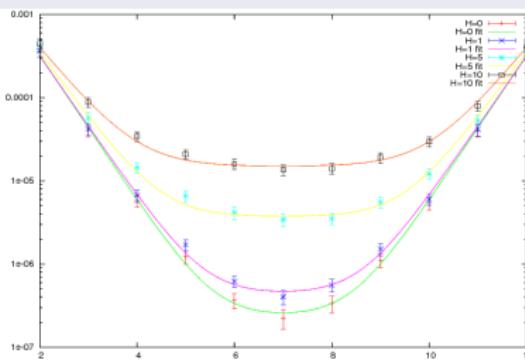
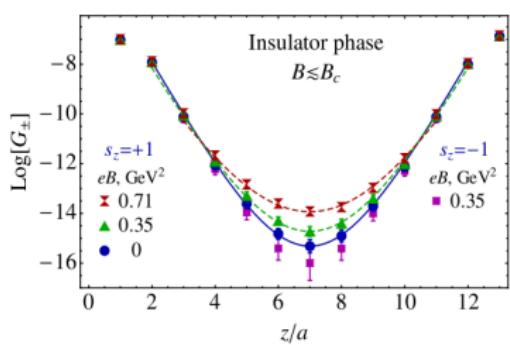


ρ мезоны становятся стабильными частицами в сильных магнитных полях

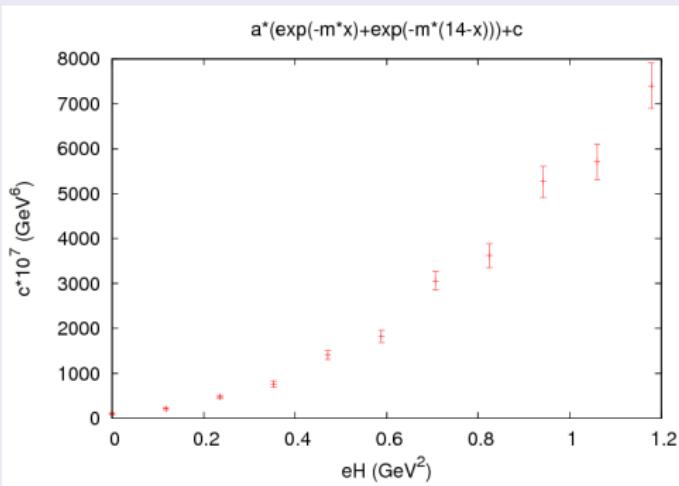
Вычисление на решетке (quenched) (arXiv:1104.3767 [hep-lat])

- Измеряется коррелятор: $G_{\pm}(x_{\parallel}) = \langle j_{\pm}(x_{\parallel})j_{\pm}(0) \rangle$, $j_{\pm} = \bar{u}(\gamma_1 \pm i\gamma_2)d$
- Если конденсата ρ -мезонов нет, то $G_{\pm}|_{x \rightarrow \infty} \sim \exp(-\mu_{\pm}x_{\parallel})$,
если есть, то $G_-|_{x \rightarrow \infty} \sim \rho^2$, $G_+|_{x \rightarrow \infty} \sim \exp(-\mu_{+}x_{\parallel})$
- Конденсата нет: $G_{\pm} \sim (e^{-\mu_{\pm}x_{\parallel}} + e^{-\mu_{\pm}(L_s - x_{\parallel})})$
Конденсат есть: $G_- \sim (e^{-\mu_{-}x_{\parallel}} + e^{-\mu_{-}(L_s - x_{\parallel})}) + \rho^2$, $G_+ \sim (e^{-\mu_{+}x_{\parallel}} + e^{-\mu_{+}(L_s - x_{\parallel})})$

Пример вычисления коррелятора

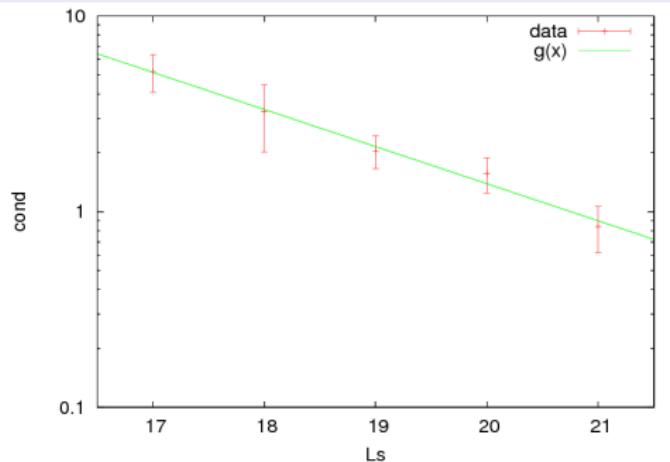


Результат вычисления конденсата на решетке 14^4 , $a = 0.1\text{fm}$



- Конденсат не равен нулю $\rho \neq 0$
- Значительное увеличение ρ при увеличении магнитного поля
- Важно изучить эффекты конечного объема!

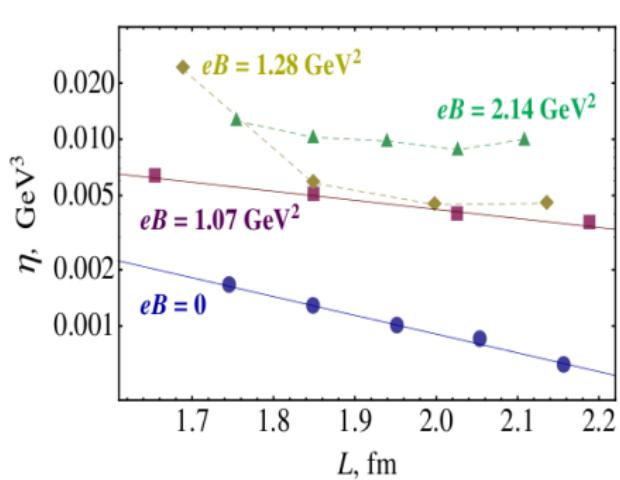
Эффекты конечного объема при $H = 0$



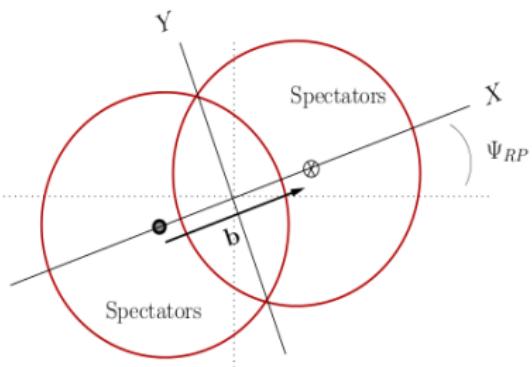
- Результаты хорошо фитируются функцией $\rho \sim \exp(-aL_s)$
- При $H = 0$ конденсата нет
- При исследовании случая $H \neq 0$ важно учитывать квантование магнитного поля на решетке $eH = \frac{2\pi n}{L_s^2 a^2}$

$$eH = \frac{2\pi n}{L_s^2 a^2}$$

Эффекты конечного объема при $H \neq 0$



- Результаты хорошо фитируются функцией $\rho \sim \exp(-aL_s)$ при $eH = 0, 1.07 \text{ GeV}^2$ и $\rho \sim \exp(-aL_s) + \text{const}$ при $eH = 1.28, 2.14 \text{ GeV}^2$
- Видим предсказанный эффект $eH_c \in (1.07, 1.28) \text{ GeV}^2$.



Elliptic flow

$$v_2 = \left\langle \frac{p_Y^2 - p_X^2}{p_Y^2 + p_X^2} \right\rangle \simeq 7\%$$

Выводы

- Результаты вычислений на решетке подтверждают теоретические предсказания
- Критическое значение магнитного поля $eH_c \in (1.07, 1.28)$ GeV^2 , $H_c \in (1.8, 2.1) \cdot 10^{16}$ Гаусс
- Возможно проявление сверхпроводимости вакуума видно(будет видно) на современных экспериментах по соударению ионов

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ