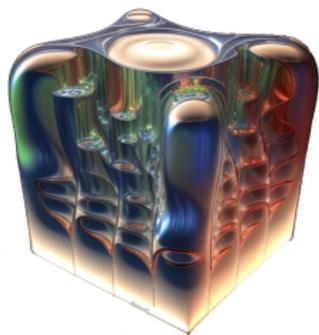


# Магнитно-индуцированная сверхпроводимость вакуума в электрослабой теории

М.Н. Чернодуб, В.А. Гой, А.В. Молочков

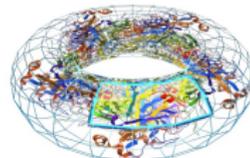
Тихоокеанский квантовый центр, Дальневосточный Федеральный Университет,  
690922, Владивосток

Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН  
г. Новосибирск  
10 – 13 марта 2026



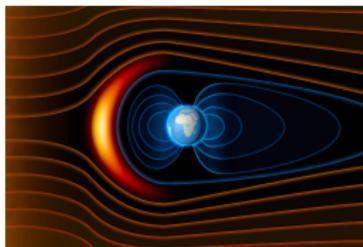
[PRL 130, 111802 (2023)]  
[arXiv:2601.14573 (2026)]

**PACIFIC QUANTUM  
CENTER**



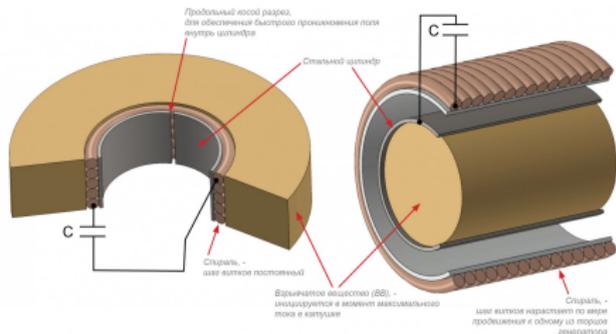
Поддержано грантом АСП-25-03-1.03-0019

# Магнитные поля, земные масштабы



На поверхности Земли:  
(30 – 60) × 10<sup>-6</sup> Тл.

Слабые (до 0.05 Тл) и средние (0.05 – 4 Тл) –  
радиотехника и электроника



МК-1

МК-2

(habr.com)

Сильные (4 – 100 Тл)

NICA, LHC, RHIC, ITER + лаб.

Сверхсильные (свыше 100 Тл)

Магнитокумулятивный генератор МК-1 (до 2800 Тл)

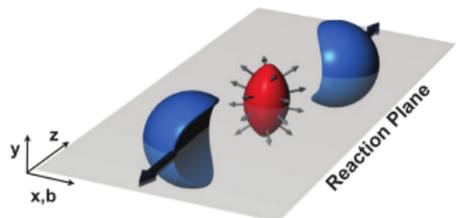
# Магнитные поля, космические масштабы

Сильно намагниченные нейтронные звезды – магнетары:  $10^8\text{--}11$  Тл (на поверхности).

[S. A. Olausen and V. M. Kaspi, *ApJS* 212 6 (2014)]

В ядре магнетаров: до  $10^{14}$  Тл.

[Christian Y. Cardall et al, *ApJ* 554 322 (2001)]



(R. Snellings arXiv:1102.3010v2)

Более мощное, но временное,  
(1 – 15)  $\times m_{\pi}^2/e \sim 10^{14}\text{--}15$  Тл

в ст. тяжелых ионов  $\rightarrow$  КГП (RHIC, LHC).

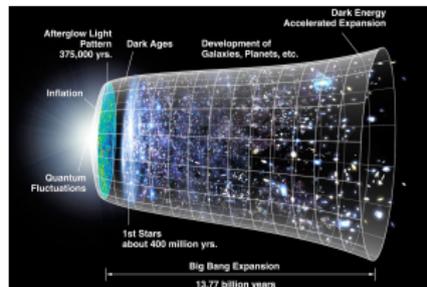
[V. Skokov, A Yu. Illarionov and V. Toneev, *Int. J. Mod. Phys. A* 24, 5925-5932 (2009), arXiv:0907.1396]

Ранняя Вселенная:  $\sim 10^{19}$  Тл.

[T. Vachaspati, *Phys. Lett. B* 265, 258-261 (1991);  
D. Grasso and H.R. Rubinstein, *Phys. Rept.* 348, 163-266 (2001), arXiv:astro-ph/0009061]



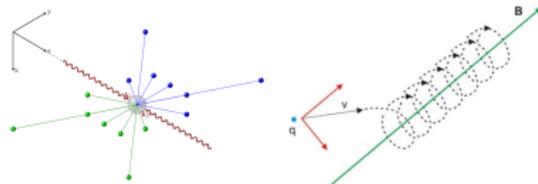
[www.quantamagazine.org]



Мы поговорим о  $m_W^2/e \sim 10^{20}$  Тл (Эл.-слаб масштаб).

# Нестабильность вакуума

|          | Эл. поле | Магн. поле |
|----------|----------|------------|
| КЭД      | неуст.   | уст.       |
| Эл.-слаб | неуст.   | неуст.     |



Уровни Ландау:

$$\text{скалярное: } E_n^2 = k_z^2 + (2n + 1)eB + m^2$$

$$\text{спинорное: } E_n^2 = k_z^2 + (2n + 1)eB - 2eB \cdot s + m^2 \quad s = \pm \frac{1}{2}$$

$$\text{векторное: } E_n^2 = k_z^2 + (2n + 1)eB - 2eB \cdot s + m^2 \quad s = \pm 1, 0$$

⇒ Существует неустойчивость:  $eB_{crit}^{(1)} = m^2$

J. Ambjorn, P. Olesen: Phys. Let. B214 (1988) 565, Nucl. Phys. B315 (1989) 606,  
Nucl. Phys. B330 (1990) 193, arXiv:hep-ph/9304220 (1993).

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & - \left\{ \frac{1}{2} |\tilde{D}_\mu W_\nu - \tilde{D}_\nu W_\mu|^2 + \frac{1}{4} f_{\mu\nu}^2 + \frac{1}{4} Z_{\mu\nu}^2 + (\partial_\mu \phi)^2 \right\} \quad (\text{kinetic}) \\ & - \left\{ \frac{g^2 \phi^2}{2} W_\mu^\dagger W_\mu + \frac{1}{2} \frac{g^2 \phi^2}{\cos^2 \theta} \frac{1}{2} Z_\mu^2 - 2\lambda \phi_0^2 \phi^2 \right\} \quad (\text{mass}) \\ & - i g (f_{\mu\nu} \sin \theta + Z_{\mu\nu} \cos \theta) W_\mu^\dagger W_\nu \quad (\text{magnetic moment}) \\ & - \frac{1}{2} g^2 \left( (W_\mu^\dagger W_\mu)^2 - W_\mu^{\dagger 2} W_\mu^2 \right) + \lambda (\phi^4 + \phi_0^4) \quad (\text{4-order}) \end{aligned}$$

Массовый член для  $W$  в присутствии магн. поля ( $f_{12} = B$ ):

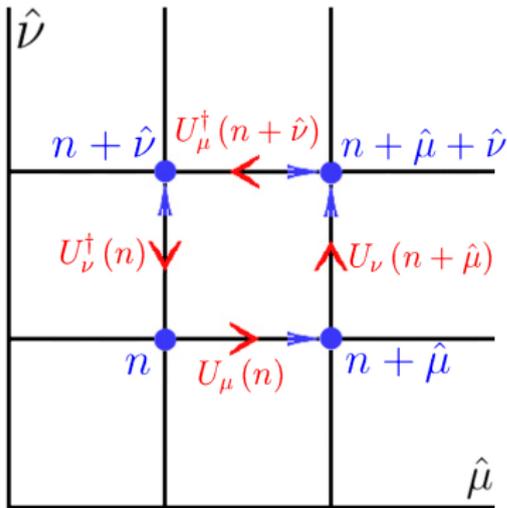
$$\begin{pmatrix} W_1^\dagger & W_2^\dagger \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_W^2 & ieB \\ -ieB & m_W^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \end{pmatrix} \Rightarrow \text{Собст. знач. } m^2 = m_W^2 \pm eB$$

если  $eB > m_W^2 \Rightarrow$  мнимая масса  
 $\Rightarrow$  конденсат!

# Решеточные расчеты

## Сложности в КТП:

- расходимости (UV и IR)
- непертурбативные эффекты играют ключевую роль в КХД

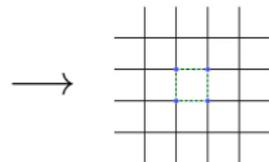


## КТП на решетке:

- вершины – поля  $\psi(x) \rightarrow \psi(n)$
- ребра – калибровочные поля  $A_\mu(x) \rightarrow U_\mu(n) = \exp\left(ig \int_n^{n+\hat{\mu}} dx_\nu A_\nu\right)$

Плакет  $U_{\mu\nu}(n) =$

$$U_\mu(n) U_\nu(n + \hat{\mu}) U_\mu^\dagger(n + \hat{\nu}) U_\nu^\dagger(n)$$



## Вильсон (1974):

(K. Wilson, Phys. Rev. D10 2445)

# Эл.-слаб. теория на решетке

Динамические поля:

- $U_{x,\mu} = \exp\left(i\frac{\sigma_i}{2} W_{x,\mu}^i\right) \in \text{SU}(2)$
- $\theta_{x,\mu} \in \mathcal{R}$
- $\phi_x = \begin{pmatrix} \phi_{1,x} \\ \phi_{2,x} \end{pmatrix}$

$$\begin{aligned} S &= \beta \sum_{x,\mu < \nu} \left(1 - \frac{1}{2} \text{Tr} U_{x,\mu\nu}\right) + \frac{\beta\gamma}{2} \sum_{x,\mu < \nu} \theta_{x,\mu\nu}^2 \quad (\text{gauge}) \\ &+ \sum_x \left(-\kappa \phi_x^\dagger \phi_x + \lambda \left(\phi_x^\dagger \phi_x\right)^2\right) \quad (\text{Higgs}) \\ &+ \sum_{x,\mu} \left| \phi_x - e^{i(\theta_{x,\mu} + \theta_{x,\mu}^B)} U_{x,\mu} \phi_{x+\hat{\mu}} \right|^2 \quad (\text{interaction}) \end{aligned}$$

Граничные условия: периодические

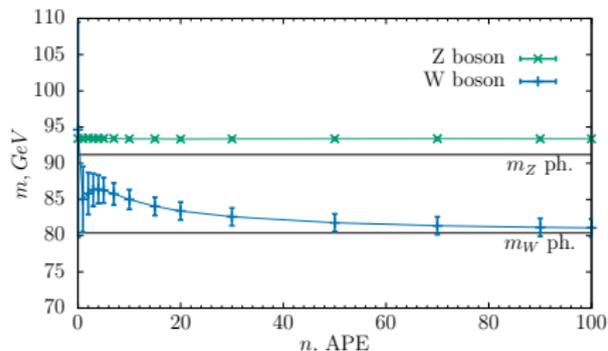
Магнитное поле: вдоль Z

Размер решетки:  $64 \times 48^3$

Параметры:  $\beta, \beta\gamma, \kappa, \lambda, \theta_{x,\mu}^B$ .

Где физическая точка?

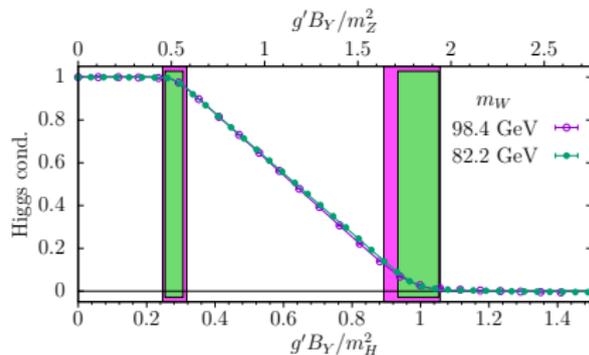
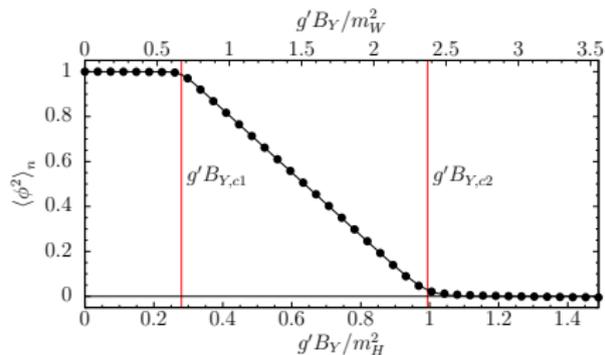
# Конденсат Хиггса для физического $m_W$

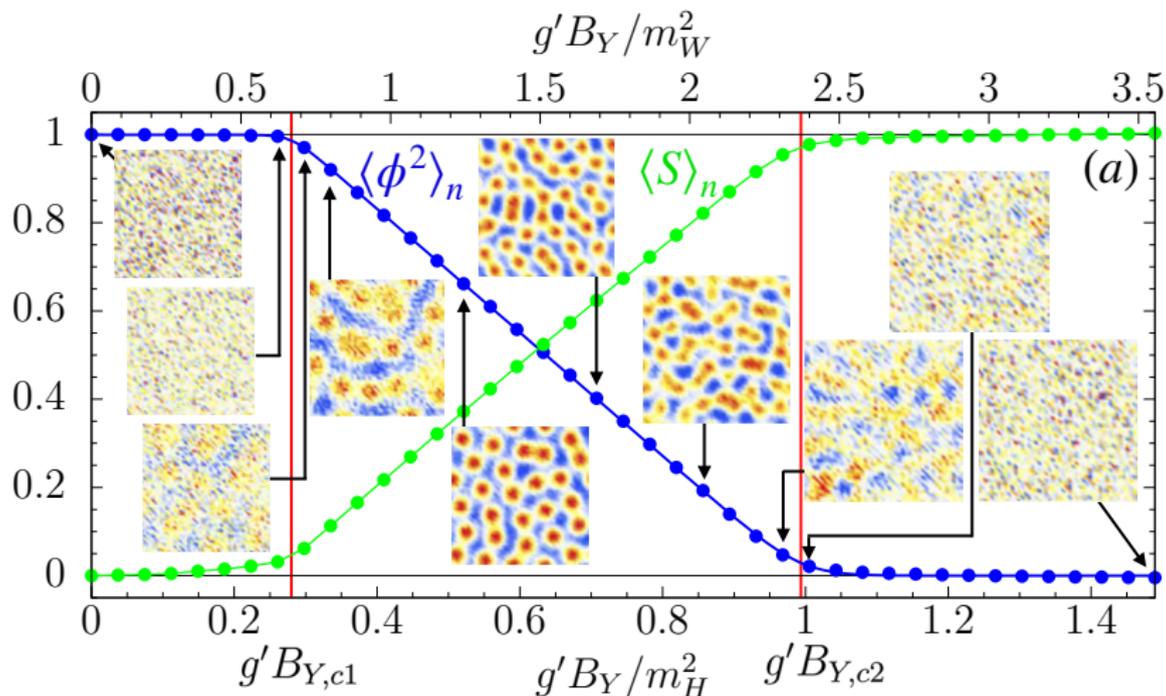


$$m_H a = 0.3831 \pm 0.0007$$

$$m_Z = 92.76 \pm 0.26 \text{ GeV} \quad [91.2 \text{ GeV}]$$

$$m_W = 82.2 \pm 0.6 \text{ GeV} \quad [80.4 \text{ GeV}]$$

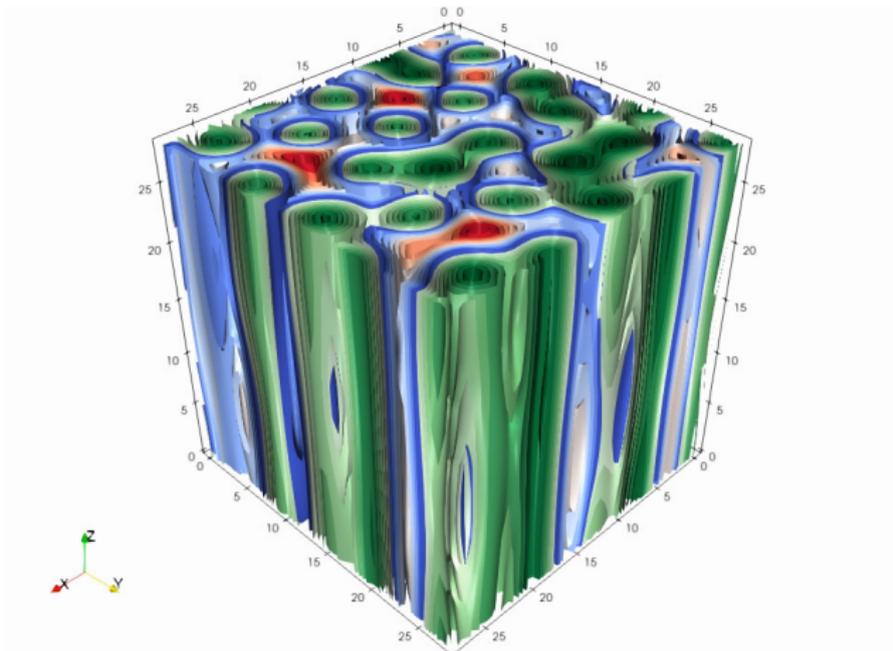




# Промежуточная фаза

$$eB = 1.1m_W^2$$

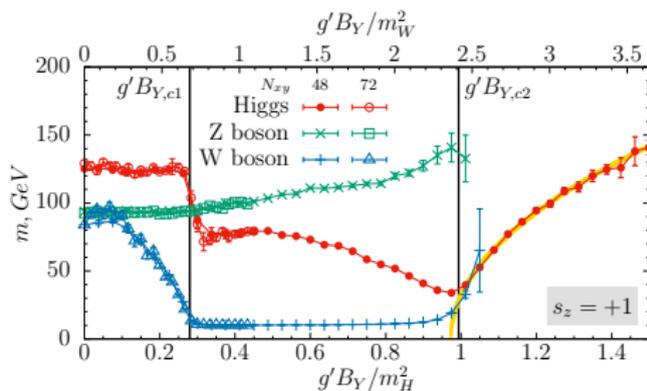
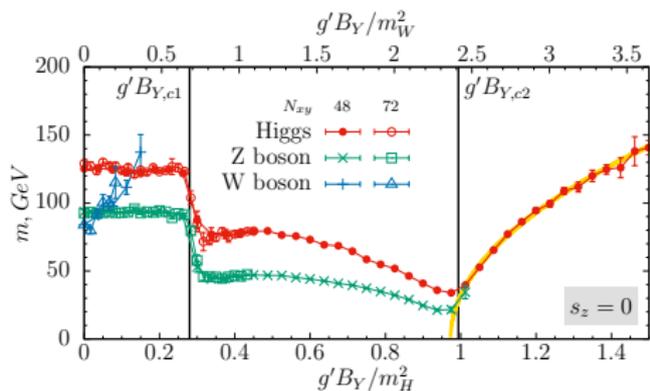
$$B_{c1} < B < B_{c2}$$



- Нет кристаллического порядка для вихрей.

По полю  $B$

Перпендикулярно полю  $B$



Уровни Ландау:  $E_{n,s_z}^2(k_z) = m^2 + (1 + 2n - g_m s_z)eB + k_z^2 = m_{\text{eff}}^2$

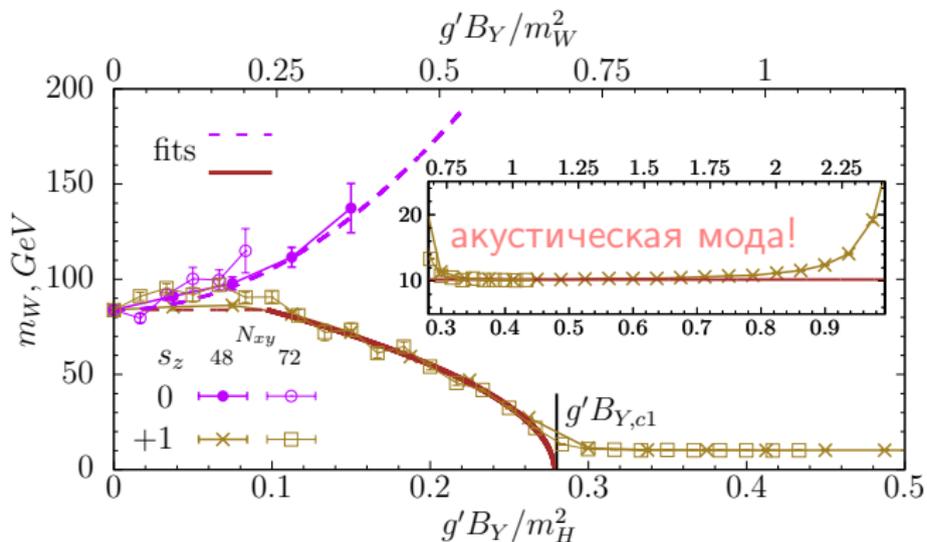
Поле Хиггса (2й переход)

$$m_H^{(\text{fit})}(B_Y) = \sqrt{m_{H^*}^2 + G(g' B_Y - m_H^2)}$$

$$m_{H^*} = 28(1) \text{ GeV}$$

$$G = 2.44(4)$$

# Спектр масс (W бозон)



$$E_{0,+}^2(0) = m_W^2 - eB$$

$$E_{0,0}^2(0) = m_W^2 + eB$$

$$E_{0,-}^2(0) = m_W^2 + 3eB$$

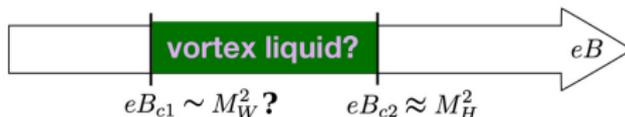
$$\underline{B_{c1} = 0.68(5)m_W^2/e}$$

$$m_{W_{s_z=+1}}^{(\text{fit})}(B) = \gamma \sqrt{\alpha m_W^2 - eB} \quad \longrightarrow \quad \underline{\alpha = 0.676(4)}, \quad \gamma = 1.57(2)$$

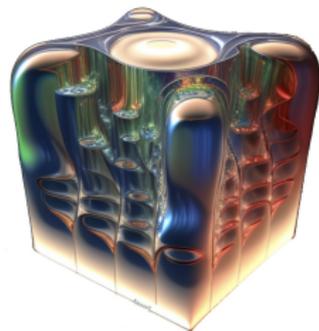
$$m_{s_z=0}^{(\text{fit})}(B) = m_W \left[ 1 + \alpha \left( \frac{eB}{m_H} \right)^2 \right] \quad \longrightarrow \quad \alpha = 26(5)$$

# Заключение

- 1 Мы наблюдали, индуцированные магнитным полем, переходы в электрослабой теории при нулевой температуре.
  - Образование конденсата  $W$ -бозонов.
  - Восстановление электрослабой симметрии (нет крит. поведения).
  - Плавные (кроссоверные) переходы.



- 2 Обнаружена акустическая фононная мода в гетерогенной фазе с конденсатом  $W$ -бозонов в сверхсильном магнитном поле.
- 3 Получена детальная спектроскопия векторных бозонов в магнитном поле, учитывая их спиновую поляризацию.



[Спасибо вам]