



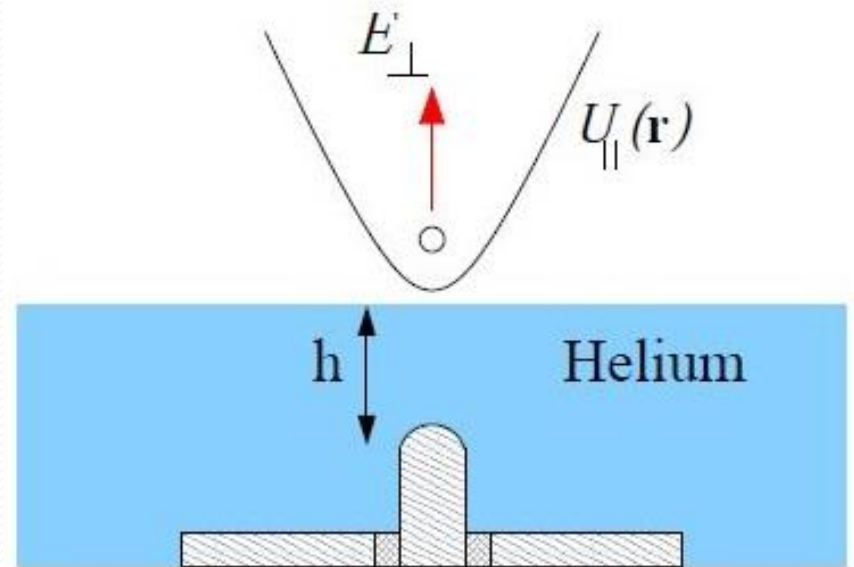
# Квантовые технологии и жидкий гелий

А.М. Константинов

Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины,  
г. Харьков

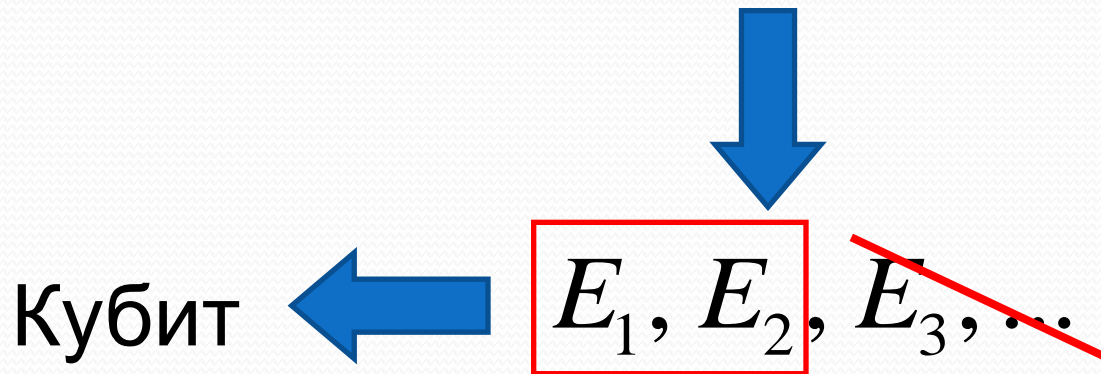
# Квантовый компьютер на основе конденсированного состояния веществ

Система: локализованный электрон в 3D потенциале, который состоит из потенциала изображения и потенциала контролирующего электрода. В качестве двух состояний электрона выступают основное и первое возбужденное для нормального движения к поверхности гелия.



# Квантовый компьютер на основе конденсированного состояния веществ

$$U(\mathbf{r}, z) \approx -\frac{(\varepsilon - 1)e^2}{4(\varepsilon + 1)z} + eE_{\perp}z + \frac{1}{2}m\omega^2 r^2$$

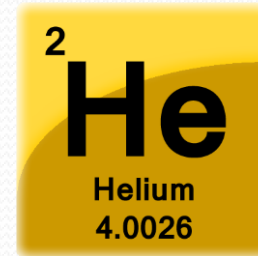


*Вопрос: какова роль подложки?*

# Квантовые жидкости

Условие «квантовости» жидкости:

$$\lambda_D > l \Leftrightarrow T < \frac{\hbar^2 n^{2/3}}{mk_B} \sim 1K$$



Энергия квантовой жидкости:

$$E(T=0) = U(\rho_0) + \int \frac{\rho_0 v^2}{2} dV$$

При  $T = T' \ll 1K$  имеем  $\rho_0 \rightarrow \rho_0 + \rho'$  и для энергии

$$E(T) = U(\rho_0) + \frac{1}{2} \sum_k \left( |\dot{y}(\mathbf{k})|^2 + \omega^2(\mathbf{k}) |y(\mathbf{k})|^2 \right)$$

$$\rho_0 k^2 \varphi(\mathbf{k})$$

$$\rho'(\mathbf{k}) / \sqrt{V \rho_0 k^2}$$

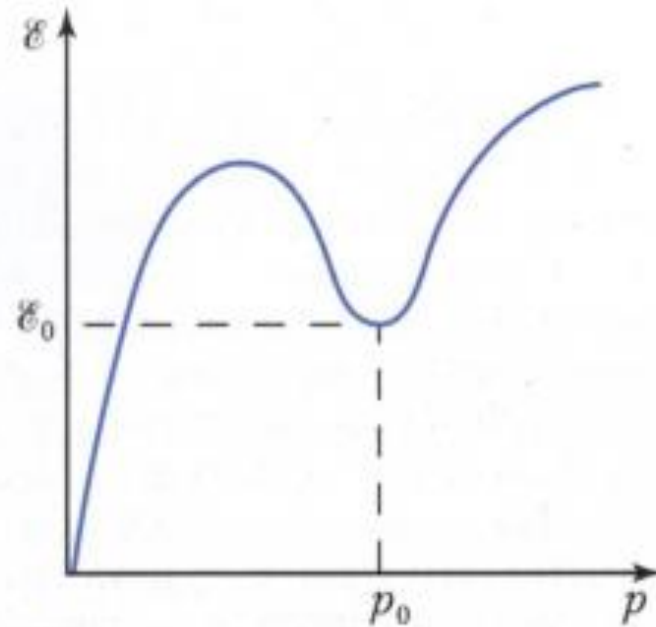
# Спектр Ландау

$$E = U(\rho_0) + \sum_k \frac{\hbar\omega_k}{2} + \sum_k \hbar\omega_k n_k$$

$E_0$  (энергия основного состояния)

Введя вектор  $\mathbf{p} \equiv \hbar\mathbf{k}$  и переопределив коэффициент в сумме, получаем

$$E = E_0 + \sum_p \varepsilon(p)n_p$$



Спектр элементарных возбуждений в He II, полученный в нейтронных экспериментах;  $\varepsilon$  – энергия квазичастицы,  $p$  – её импульс.

# Явление сверхтекучести

Твердое тело, двигаясь в квантовой жидкости, испытывает трение в результате рассеяния на нем тепловых возбуждений.

## Предельные случаи

$$T = 0$$



тепловых  
возбуждений нет



трения нет



жидкость сверхтекучая

$$T \sim 2K$$



тепловые возбуждения  
пронизывают всю жидкость



трение выходит на максимальное  
значение



жидкость нормальная

# Явление сверхтекучести

В промежуточном случае жидкость обладает двумя компонентами: как нормальной составляющей (газ тепловых возбуждений), так и сверхтекучей (часть жидкости без тепловых возбуждений). В результате приходим к **двужидкостной модели Ландау**:

$$\rho = \rho_n + \rho_s$$

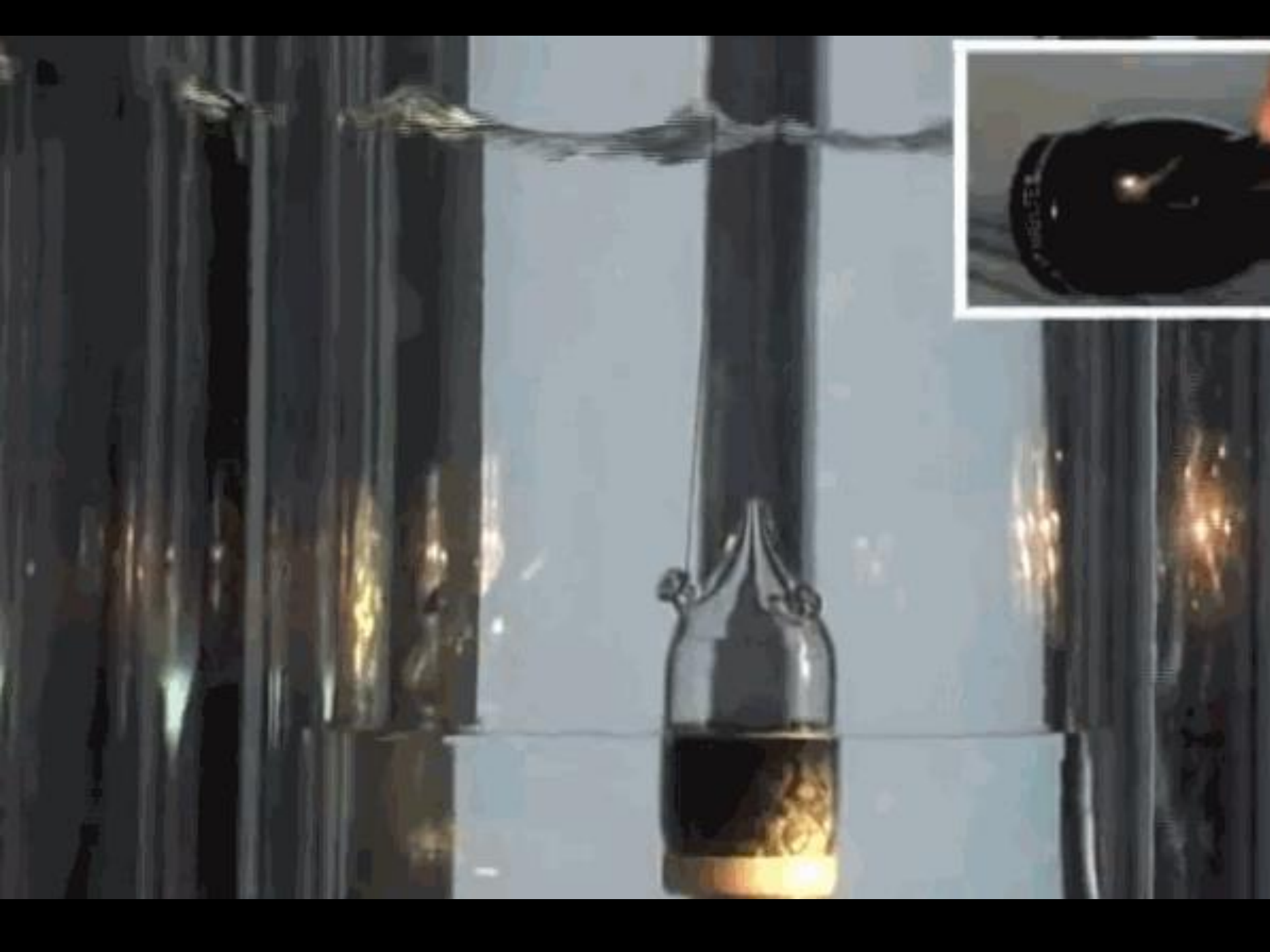
$$\mathbf{j} = \rho_n \mathbf{v}_n + \rho_s \mathbf{v}_s$$

Эксперименты и уникальные свойства:

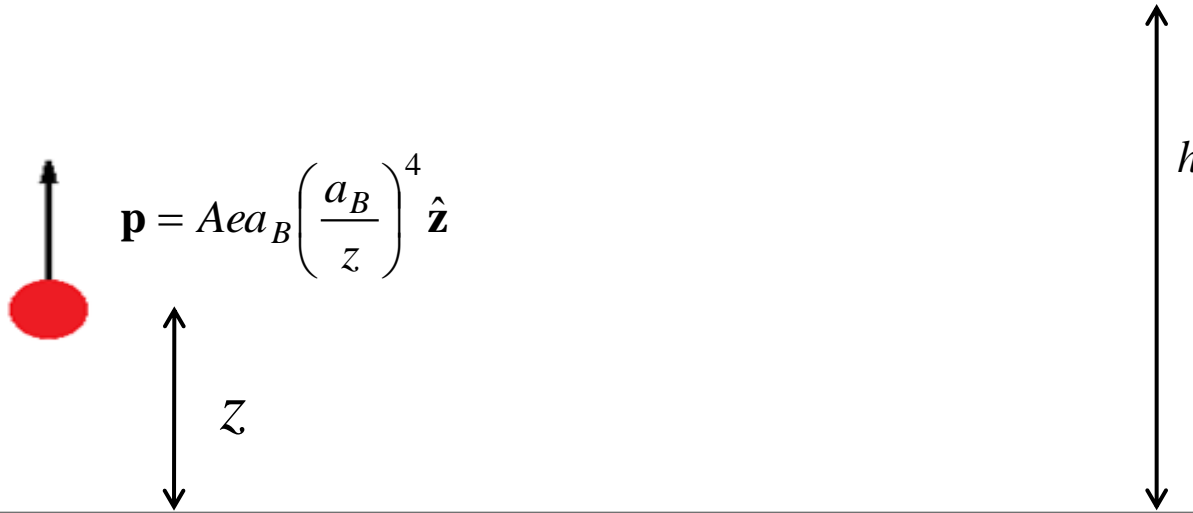
- конвективная сверхтеплопроводность;
- эффект фонтанирования;
- наличие 4-х звуков;
- вытекание гелия из сосуда;
- и т.д.







# К электрическим эффектам



3D поляризация пленки:

$$\mathbf{P}_3 = Aea_B \left( \frac{a_B}{z} \right)^4 n_3 \hat{\mathbf{z}}$$

2D поляризация пленки:

$$\mathbf{P}_2 = \int \mathbf{P}_3 dz = \frac{1}{3} Aea_B \left( \frac{a_B^4}{a^4} - \frac{a_B^4}{h^3 a} \right) n_2 \hat{\mathbf{z}}$$

# Роль третьего звука

Линеаризованная (нестационарная) часть 2D поляризации равна

$$\mathbf{P}'_S = Aea_B \left( \frac{a_B}{h_0} \right)^4 \frac{h'}{a} n_2 \hat{\mathbf{z}} \equiv Ph' \hat{\mathbf{z}} \quad \longrightarrow \quad h' - ?$$

Осциллирующая составляющая высоты пленки реализуется в условиях распространения **третьего звука**

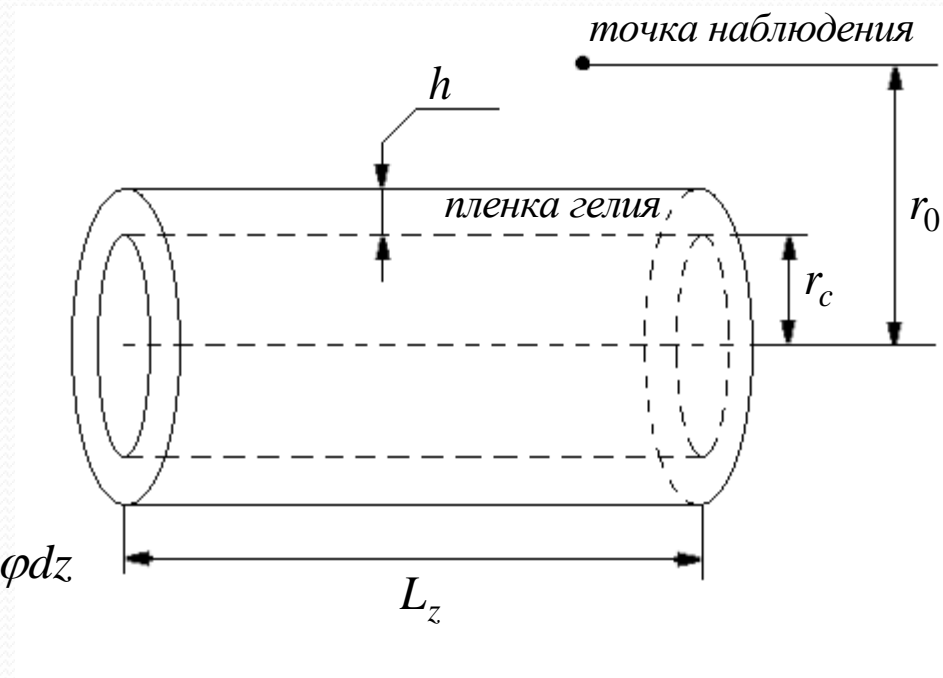
Третий звук – поверхностная волна, длина волны которой существенно превышает толщину пленки. При этом нормальная компонента остается в покое (относительно подложки), а сверхтекучая компонента осциллирует параллельно подложке.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\rho_{s0}}{\rho} \nabla(h\mathbf{v}_s) = 0 \\ \frac{\partial \mathbf{v}_s}{\partial t} + (\mathbf{v}_s \nabla) \mathbf{v}_s = -\frac{3\alpha}{h^4} \nabla h \end{array} \right. \quad \xrightarrow{\text{Линейное приближение}} \quad \begin{array}{l} h' = \rho_s h_0 v' / \rho_0 c_3 \\ c_3^2 = \rho_s \alpha / \rho_0 h_0^3 \end{array}$$

# Реализация

Распространение третьего звука приводит к появлению электрического поля в окружающем пространстве. Осциллирующая часть потенциала  $\phi$  в точке с координатами  $\mathbf{R}_0 = (\mathbf{r}_0, z_0)$

$$\phi(\mathbf{R}_0) = P \int h'(z, t) r_c \frac{\partial}{\partial r_c} \frac{1}{\sqrt{(\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_0)^2 + (z - z_0)^2}} d\varphi dz$$



В предположении, что  $L_z \gg \lambda$  и  $L_z \gg z_0$  получаем снаружи цилиндра

$$\phi(\mathbf{R}_0) = -4\pi P h'_a(t) k r_c I_1(k r_c) K_0(k r_0) \sim K_0(k r_0) \cdot 10^{-6} B$$

# Выводы

Предсказано, что распространение волны третьего звука в пленке сверхтекучего гелия должно сопровождаться появлением электрического поля в окружающем пространстве, которое доступно наблюдению современными измерительными устройствами.

Более полная информация имеется в статье  
С.И. Шевченко, А.М. Константинов, Письма в ЖЭТФ **104**, 518 (2016).



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

# Bibliography

- A. S. Rybalko, *Low Temp. Phys.* **30**, 994 (2004).
- A. S. Rybalko and S. P. Rubets, *Low Temp. Phys.* **31**, 623 (2005).
- A. M. Kosevich, *Low Temp. Phys.* **31**, 839 (2005).
- V. D. Natsik, *Low Temp. Phys.* **31**, 915 (2005).
- L. A. Melnikovskiy, *J. Low Temp. Phys.* **148**, 559 (2007).
- E. A. Pashitskii and A. A. Gurin, *J. Exp. Theor. Phys.* **111**, 975 (2010).
- V. M. Loktev and M. D. Tomchenko, *Low Temp. Phys.* **34**, 262 (2008).
- S. I. Shevchenko and A. S. Rukin, *JETP Lett.* **90**, 42 (2009).
- M. D. Tomchenko, *J. Low Temp. Phys.* **158**, 854 (2010).
- S. I. Shevchenko and A. S. Rukin, *Low Temp. Phys.* **38**, 905 (2012).
- Yu. M. Poluektov and A. S. Rybalko, *Low Temp. Phys.* **39**, 770 (2013).
- I. N. Adamenko and E. K. Nemchenko, *Low Temp. Phys.* **41**, 495 (2015).
- I. N. Adamenko and E. K. Nemchenko, *Low Temp. Phys.* **42**, 258 (2016).
- Yu. S. Barash, *Van der Waals Forces* (Nauka, Moscow, 1998) [in Russian].
- P. R. Antoniewicz, *Phys. Rev. Lett.* **32**, 1424 (1974).
- B. Linder and R. A. Kromhout, *Phys. Rev. B* **13**, 1532 (1976).
- G. I. Salitra, *Sov. Phys. JETP* **60**, 984 (1984).
- S. Putterman, *Superfluid Hydrodynamics*, North-Holland Series in Low Temperature Physics (American Elsevier, USA, 1974).
- K. R. Atkins, *Phys. Rev.* **113**, 962 (1959).
- D. J. Bergman, *Phys. Rev.* **188**, 370 (1969).
- V. Ambegaokar, B. I. Halperin, D. R. Nelson, and E. D. Siggia, *Phys. Rev. B* **21**, 1806 (1980).
- E. B. Sonin, *Phys. Rev. B* **55**, 485 (1997).
- S. Teitel, *J. Low Temp. Phys.* **46**, 77 (1982).
- J. Machta and R. A. Guyer, *J. Low Temp. Phys.* **74**, 231 (1989).
- M.I. Dykman, P. M. Platzman, and P. Seddighrad, *Phys. Rev. B* **67**, 155402 (2003).

