



"МИС-РТ"-2024 Сборник № 85-2 <http://ikar.udm.ru/mis-rt.htm>



Странное излучение и макроскопические квантовые явления

Чистолинов Андрей Владимирович
ОИВТ РАН

I. Экспериментальное обнаружение странного излучения

Эксперимент по электровзрыву проводников в жидкости*

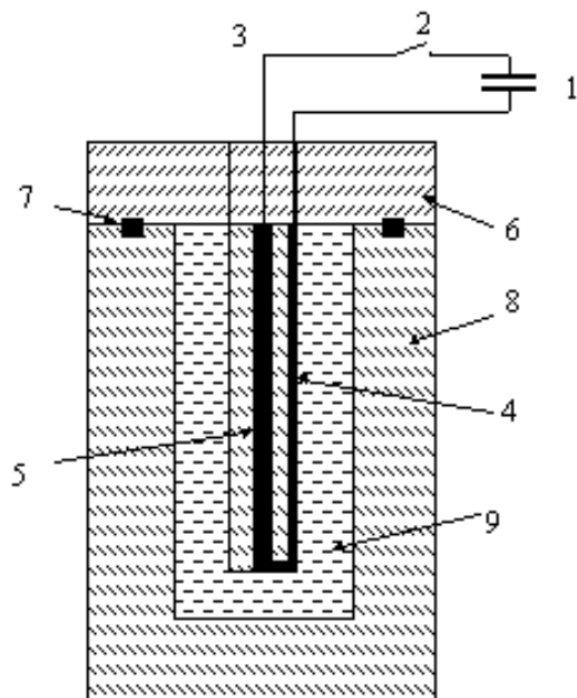
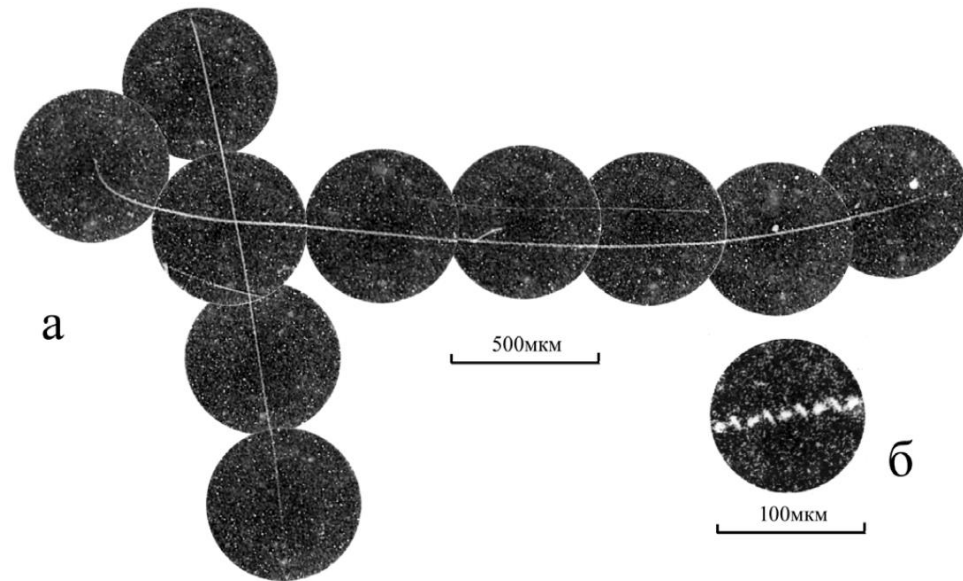


Схема установки: 1-конденсаторная батарея, 2-разрядник, 3-кабель, 4-фольга, 5-электрод, 6-полиэтиленовая крышка, 7-уплотнение, 8-полиэтиленовая взрывная камера, 9-жидкость.

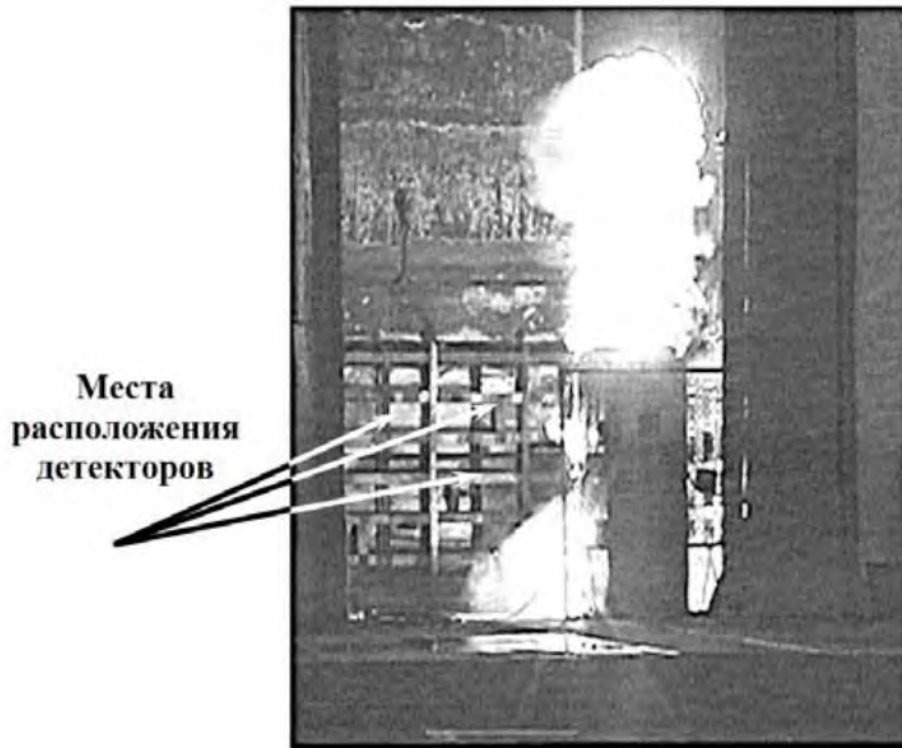


Типичный трек на флюорографической пленке РФ – 3МП.

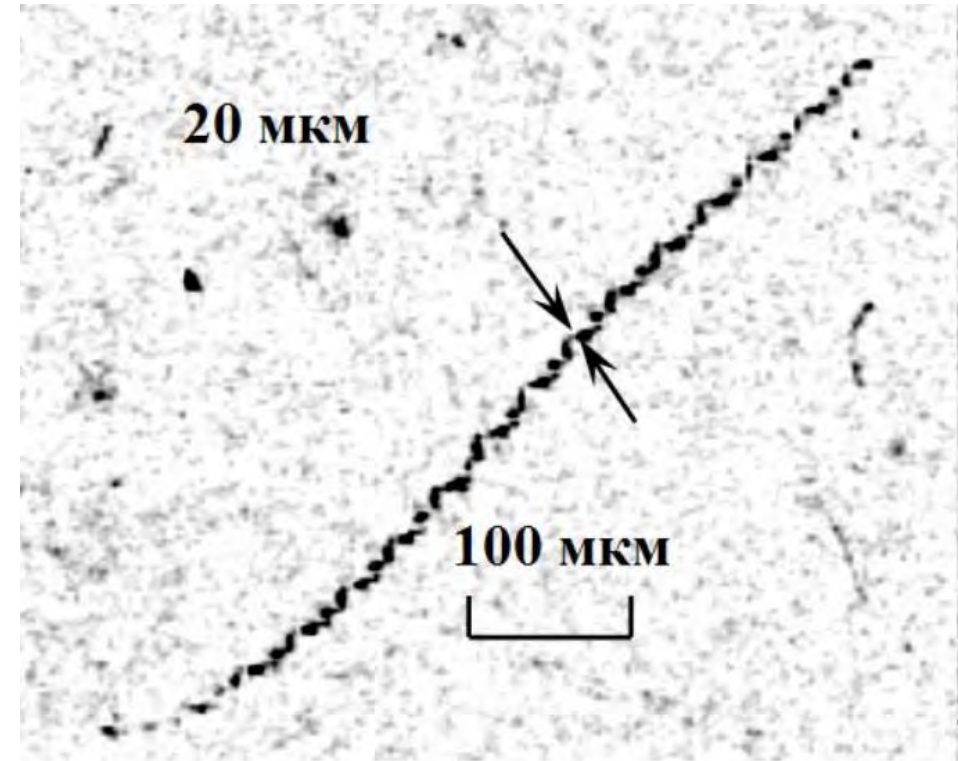
Энергия конденсаторной батареи $W \sim 50$ кДж, напряжение $U \sim 5$ кВ, время разряда $\tau \sim 120$ мкс, нагрузка - титановая фольга, расстояние от установки до плёнок до 4 м.

*Уруцкоев Л. И. и др. // Прикладная физика. 2000. № 4. с. 83-100.

Эксперимент с сильноточным дуговым разрядом*



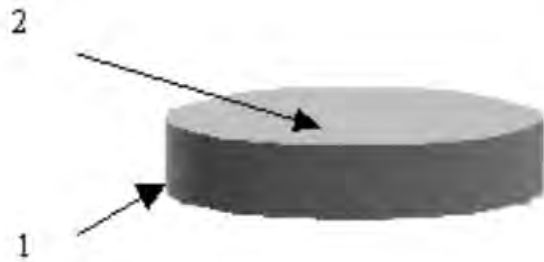
Короткое замыкание на шинах в комплектном распределительном устройстве (КРУ). Ток короткого замыкания до 40 кА. Напряжение до 10 кВ.



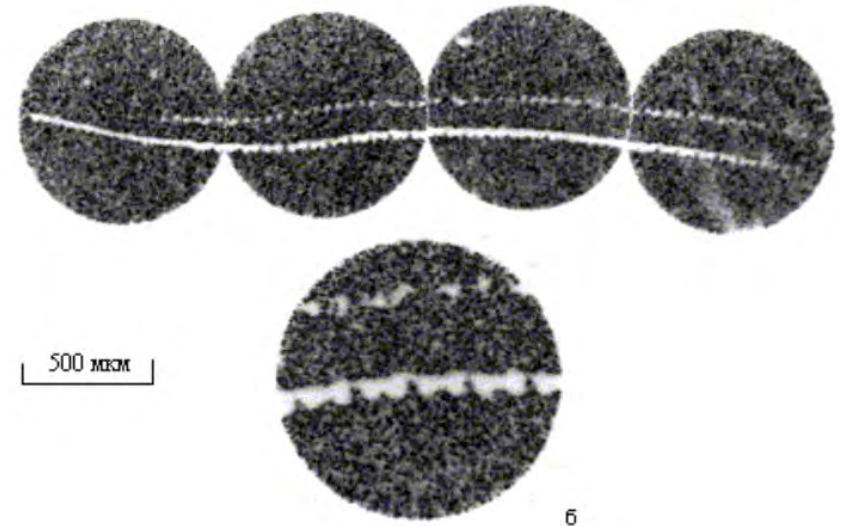
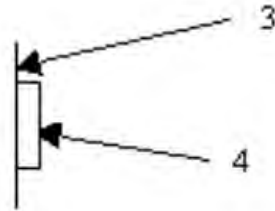
Трек на рентгеновской флюорографической пленке РФ – ЗМП.

*Агапов А. С. и др. // Прикладная физика. 2007. №1. с. 36 – 44.

Накопление источников странного излучения в веществе*



а



б

а) Схема опыта: 1- чашка Петри, 2- остатки воды и фольги после электровзрыва, 3- фотопленка РФ, 4- световолоконная шайба. Расстояние между чашкой Петри и фотоплёнкой 10 см. Время экспозиции 18 ч.

б) Трек, образовавшийся на фотоплёнке в результате экспонирования, и его увеличенный фрагмент.

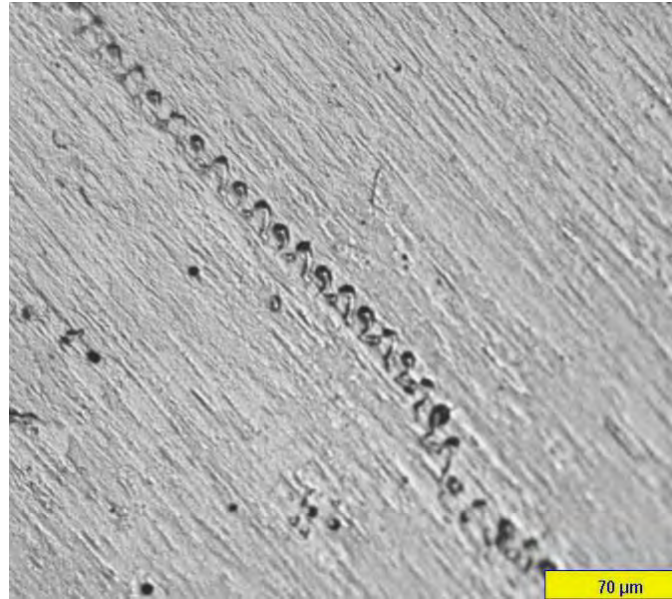
На рисунке б) хорошо видно, что основной трек сопровождается парным треком, параллельным основному.

*Уруцкоев Л. И. и др. // Прикладная физика. 2000. № 4. с. 83-100.

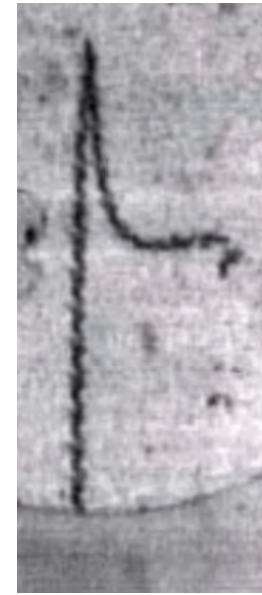
Типичные треки странного излучения



В. А. Скворцов, трековый детектор RC-39, лазерно-индуцированный вакуумный разряд



И. Б. Савватимова, поверхность палладиевого катода, тлеющий разряд в дейтерии, $I=150$ мА.



С. В. Адаменко, плёнка Al на Si подложке, сильноточный вакуумный разряд



М. И. Солин, поверхность застывшего расплава циркония, электронно-лучевая плавка, $E \sim 30$ кэВ.

Основные свойства странного излучения

1. **Источниками излучения являются электрофизические процессы с характерной энергией ≤ 1 эВ на частицу:** электровзрыв проводников, сильноточный дуговой разряд, тлеющий разряд и др.
2. **Источником излучения являются как вышеприведённые процессы, так и материалы, которые были подвергнуты их воздействию.** Причём, эти материалы остаются источниками странного излучения сутками.
3. **Излучение с одной стороны обладает высокой проникающей способностью, оно способно проходить через преграды из плотного вещества толщиной в сантиметры и при этом не оставлять в них никаких заметных следов, а с другой достаточно сильно взаимодействует с этими же материалами** (фотоматериалы, пластик, металлы), оставляя на их поверхности макроскопические следы - треки.
4. **Следы обнаруживаются только на поверхности материалов** и не проникают вглубь, причём независимо от ориентации поверхности относительно направления на источник излучения.
5. **Следы являются периодическими**, причём могут иметь место колебания как ширины следа, так и поперечные колебания следа в плоскости поверхности детектора. Характерная амплитуда таких колебаний 5-50 мкм.
6. **Периодический рисунок следа имеет в общем случае индивидуальный характер**, то есть, не существует двух следов со строго одинаковой структурой.
7. **Никогда не наблюдается сопутствующих следов δ -электронов** вблизи треков странного излучения.
8. **Основной след может сопровождаться сопутствующим следом параллельным основному**, причём длина и ширина сопутствующего следа обычно отличается от основного. Характерное расстояние между парными следами составляет 100-150 мкм.

Публикации по странному излучению

1. Уруцкоев Л. И. и др.// Прикладная физика. 2000. № 4. с. 83-100.
2. Urutskoev L.I. // Annales de la Fondation Louis de Broglie. 2004. V 29. № 3. p. 1149–1164.
3. Агапов А. С. и др. //Прикладная физика. 2007. №1. с. 36 – 44.
4. Rodionov B. U., Savvatimova I. B. //Condensed Matter Nuclear Science. 2006. p. 421.
5. Солин М. И.// Физическая мысль России. 2001. № 1. с. 43-58.
6. Адаменко С. В., Высоцкий В. И. //Поверхность. 2006. № 3. с. 84–92.
7. Pryakhin E.A. et al. // Annales de la Fondation Louis de Broglie. 2006. V 31. No 4. p. 463-472.
8. Пряхин Е.А. и др. // Инженерная физика. 2019. № 12. с. 3-17.
9. Пряхин Е.А. и др. // Известия РАН. Серия физическая 2020. Т. 84. № 11. с. 1560–1568.
10. Чижов В.А. // Инженерная физика. 2022. № 2. с. 28-36.

II. Макроскопические квантовые объекты

Предположения лежащие в основе теории

В основе теории странного излучения лежит представление о стабильной материи, слабо взаимодействующей с обычным веществом и способной проходить сквозь него. Идея о существовании такой материи не является новой. Согласно представлениям современной физики такая материя существует и по общей массе во Вселенной она примерно в 6 раз превосходит массу обычного вещества.

Особенности постулируемой материи: эта материя должна находиться в конденсированной фазе и содержаться в большом количестве в плотном атомарном веществе.

Такую материю мы будем называть **квинтэссенцией** (от лат. quinta essentia – пятая сущность).

Термин восходит к философии Аристотеля. В современной физике он применяется для обозначения одной из моделей тёмной энергии (модель скалярного поля)*. В том значении, в котором используем его мы, он относится не к тёмной энергии, а к тёмной материи, что с нашей точки зрения более соответствует изначальному смыслу этого термина в философии Аристотеля, а также его интерпретации в античной и средневековой философии.**

*Caldwell R. R., Dave R., Steinhardt P. J. Cosmological Imprint of an Energy Component with General Equation-of-State. *Physical Review Letters*. **80** (8): 1582–1585. (1998).

D. M. Jacobs, G. D. Starkman and B. W. Lynn Macro dark matter MNRAS **450, 3418–3430 (2015).

Модели современной физики

1. Модель точечных частиц:

- a) классическая механика;
- b) релятивистская механика.

2. Модель сплошной среды:

- a) жидкость/газ;
- b) твёрдое тело.

3. Теория поля:

- a) векторное поле (например: электромагнитное);
- b) тензорное поле второго ранга (например: гравитационное);
- c) тензорные поля других рангов, в том числе комбинированные.

4. Квантовая механика точечных частиц:

- a) классическая;
- b) релятивистская.

5. Квантовомеханическая модель сплошной среды:

- a) жидкость/газ;
- b) твёрдое тело.

6. Квантовая теория поля.

Модели современной физики

1. Модель точечных частиц:

- a) классическая механика;
- b) релятивистская механика.

2. Модель сплошной среды:

- a) жидкость/газ;
- b) твёрдое тело.

3. Теория поля:

- a) векторное поле (например: электромагнитное);
- b) тензорное поле второго ранга (например: гравитационное);
- c) тензорные поля других рангов, в том числе комбинированные.

4. Квантовая механика точечных частиц:

- a) классическая;
- b) релятивистская.

5. Квантовомеханическая модель сплошной среды:

- a) жидкость/газ;
- b) твёрдое тело.

6. Квантовая теория поля.

Постулаты теории квинтэссенции

1. Квинтэссенция существует и её много на Земле.
2. Все плотные тела на поверхности Земли содержат квинтэссенцию и поверхность квинтэссенции обычно совпадает с поверхностью плотных тел.
3. Квинтэссенция квантово вырождена и является бозе-жидкостью.
4. В квинтэссенции существует стандартный для любой бозе-жидкости набор квазичастиц: фононы, ротоны и квантовые вихри. В ней также могут находиться твёрдые частицы квинтэссенции.
5. Странное излучение — отождествляется с квантовыми вихревыми структурами в квинтэссенции.

Направления исследований в рамках парадигмы квинтэссенции

1. Аномальное (странное) излучение.
2. Аномальные атмосферные явления (шаровая молния).*
3. Аномальные ядерные процессы (ЛЕНР).**
4. Аномальные процессы в химии (процессы происходящие под действием странного излучения).
5. Аномальные явления в биологических организмах (от ЛЕНР процессов до парапсихологических феноменов).
6. Аномальные явления в астрофизике и космологии (тёмная материя).

*Чистолинов А.В. Странное излучение и микро шаровые молнии в воздухе. Доклад на семинаре «Высокоэнергетические процессы в конденсированных средах» 04.10.2023.

**Чистолинов А.В. О механизмах генерации странного излучения и его связи с ЛЕНР процессами. Доклад на семинаре «Высокоэнергетические процессы в конденсированных средах» 14.06.2023.

Основы теории сверхтекучести

Согласно теории сверхтекучей жидкости, предложенной Л.Д. Ландау*, **сверхтекучая жидкость (гелий II) состоит из двух компонент: нормальной и сверхтекучей компоненты**, способных проходить друг сквозь друга. Причём, собственно свойством сверхтекучести, то есть, способностью течь без трения обладает только одна – сверхтекучая компонента. Нормальная же компонента ведёт себя как обычная жидкость.

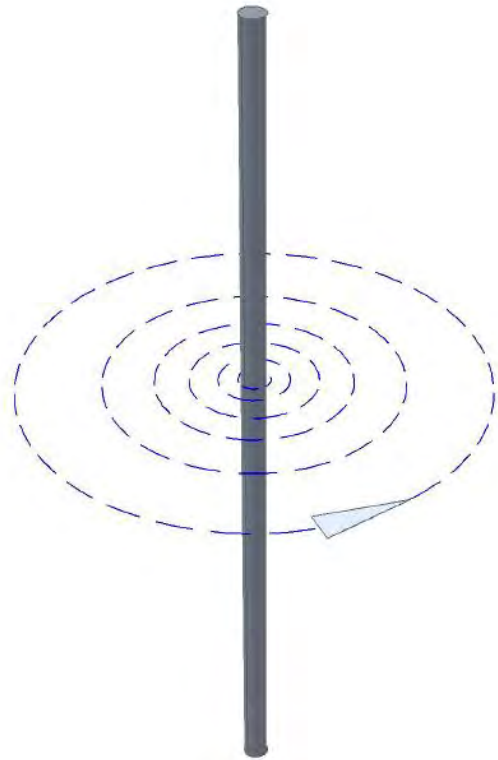
Интересным **свойством сверхтекучей компоненты является то, что её вращение**, как предположили независимо Л. Онсагер** и Р. Фейман*** (что было впоследствии экспериментально подтверждено) **связано с образованием макроскопических квантовых объектов в объёме жидкости – квантовых вихревых нитей.**

*Ландау Л.Д. Теория сверхтекучести гелия II // ЖЭТФ 11, 592 (1941).

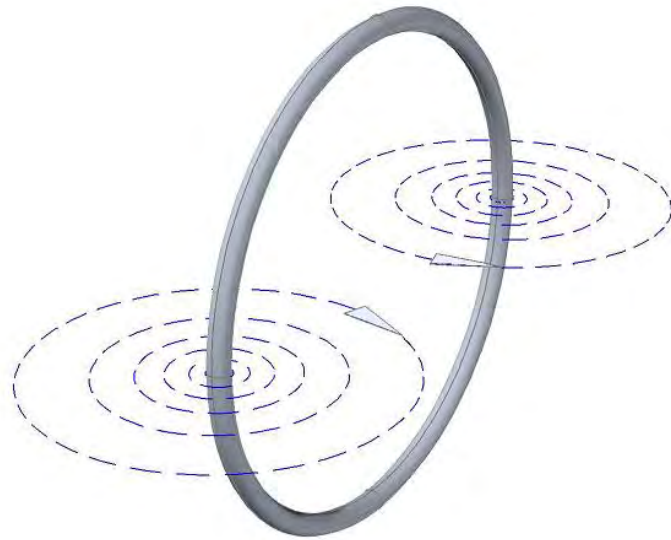
**Onsager L. Statistical hydrodynamics // Il Nuovo Cimento (1943–1954). 1949. V. 6. P. 279–287.

***Feynman R. P. Progress in Low Temperature Physics. Amsterdam: North-Holland, 1955. V. 1 / ed. by C. J. Gorter. P. 17.

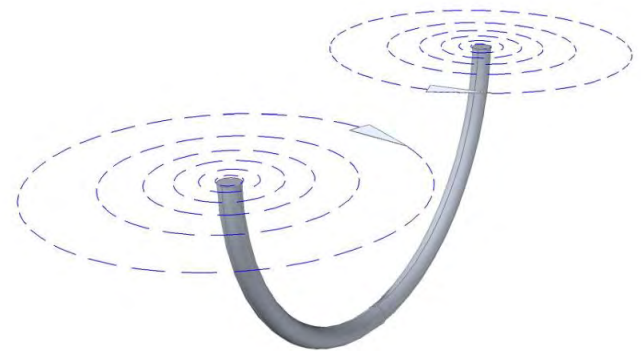
Макроскопические квантовые объекты в сверхтекучей жидкости



Квантовая вихревая нить

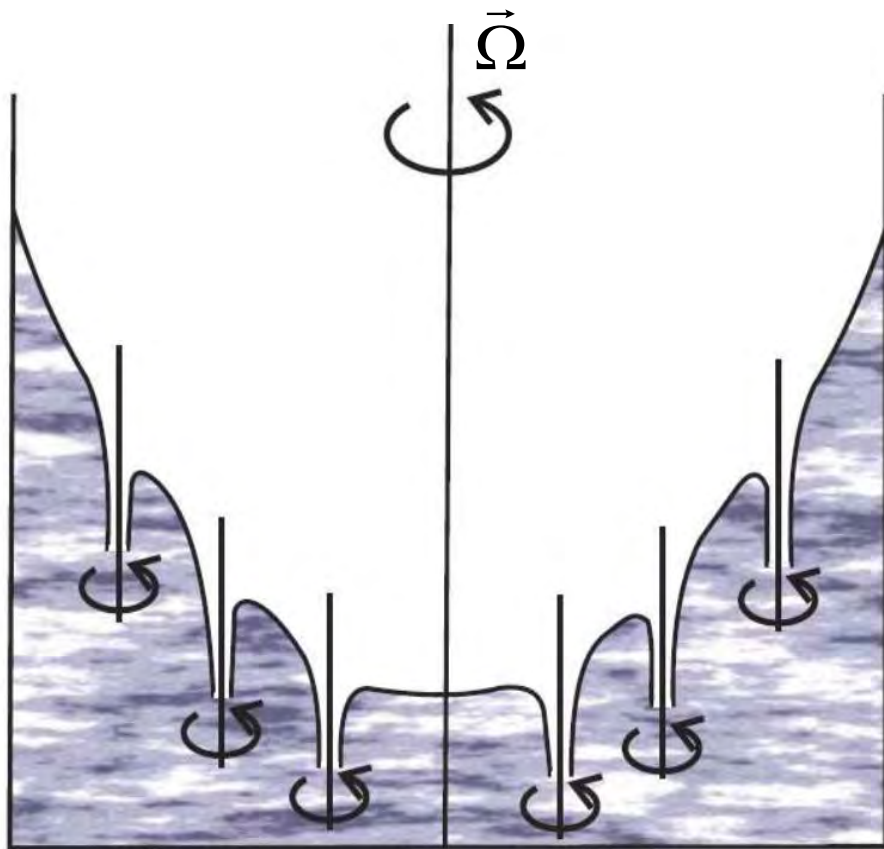


Квантовое вихревое кольцо

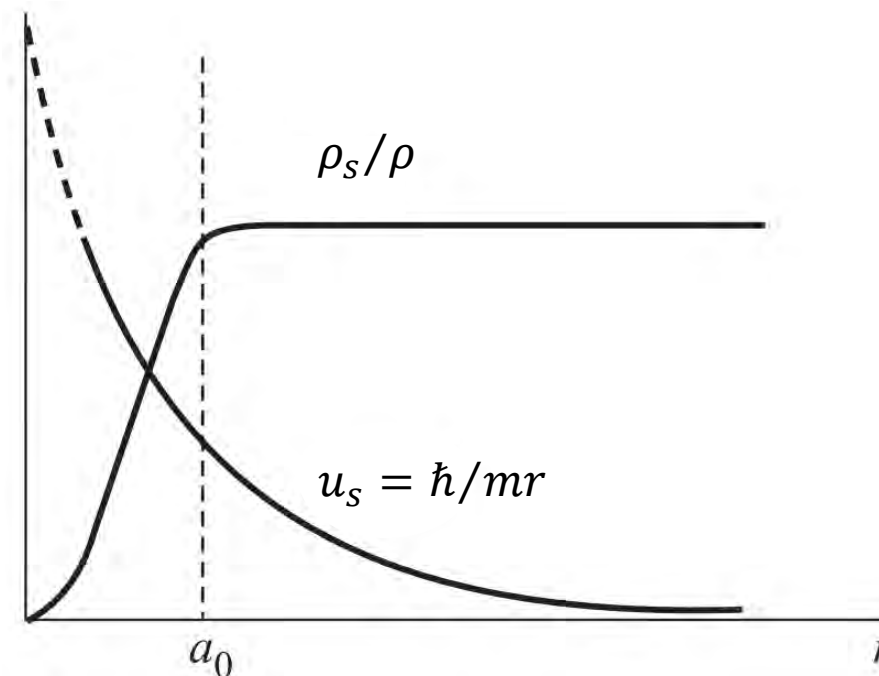


Квантовое вихревое полукольцо

Образование квантовых вихревых нитей во вращающемся сверхтекучем гелии



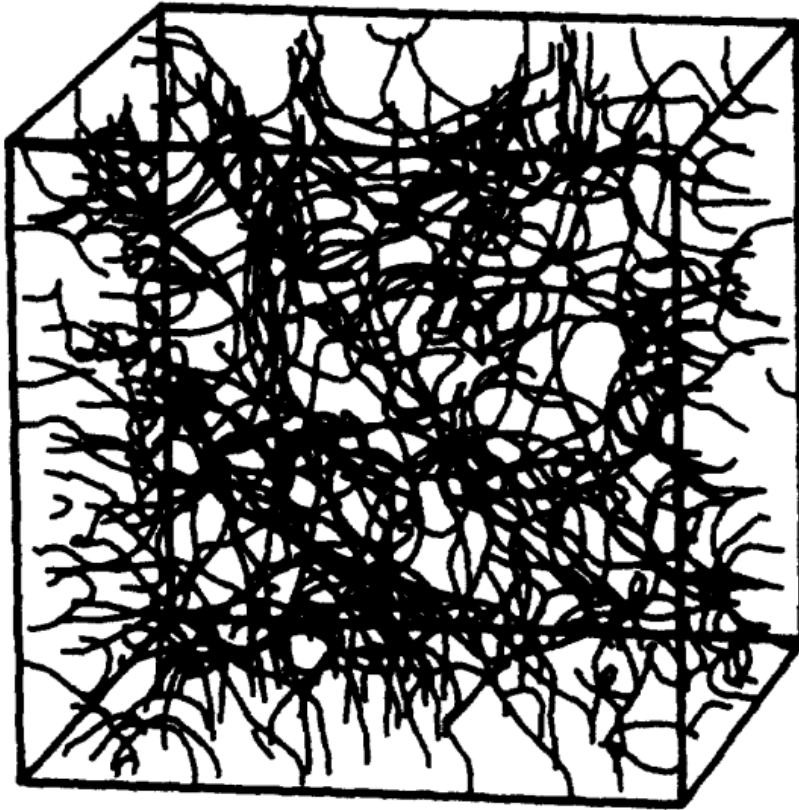
Вращение сверхтекучей компоненты сверхтекучего гелия происходит за счёт появления квантовых вихревых нитей в его объёме.



Устройство квантовой вихревой нити.

где ρ_s - плотность сверхтекучей компоненты,
 ρ - плотность жидкости,
 u_s - скорость сверхтекучей компоненты,
 m - масса частицы сверхтекучей жидкости,
 r - расстояние до оси вихревой нити
 a_0 - радиус сердцевинки вихревой нити.

Квантовая турбулентность в сверхтекучем гелии



Квантовую турбулентность можно характеризовать суммарной длиной квантовых вихревых нитей в единице объёма:

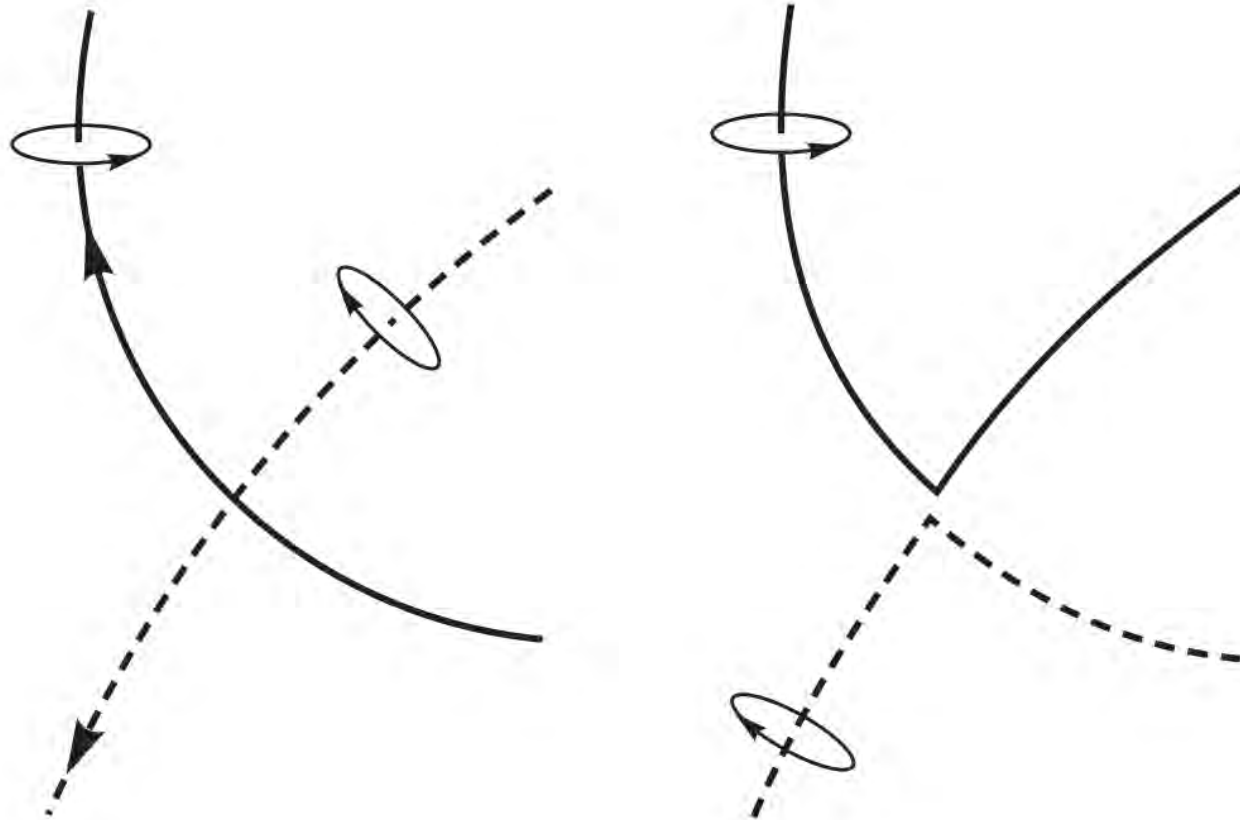
$$\mathcal{L} = \frac{L_{\Sigma}}{V},$$

где L_{Σ} - суммарная длина квантовых вихревых нитей в объёме V .

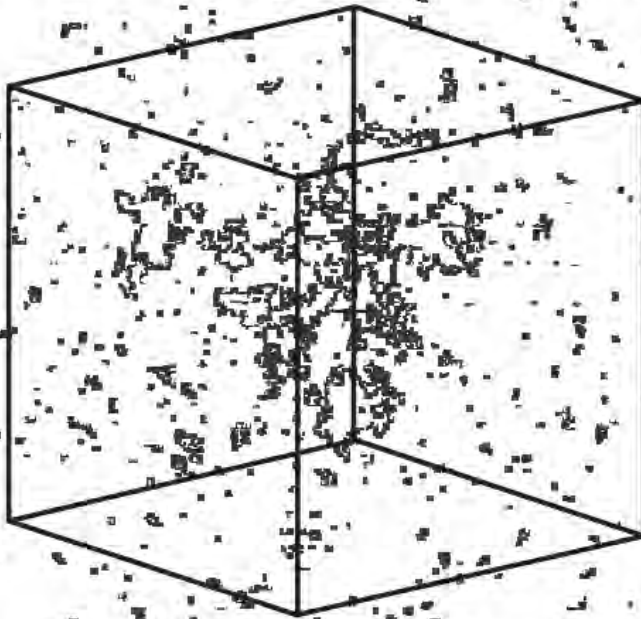
Эта величина называется **плотностью вихревых линий (ПВЛ)**.

Schwarz K. W. Three-dimensional vortex dynamics in superfluid he 4: Homogeneous superfluid turbulence // Phys. Rev. B. 1988. Aug. V. 38, N 4. P. 2398–2417.

Реконнекция квантовых вихревых нитей в сверхтекучем гелии



Генерация квантовых вихревых колец квантовой турбулентностью

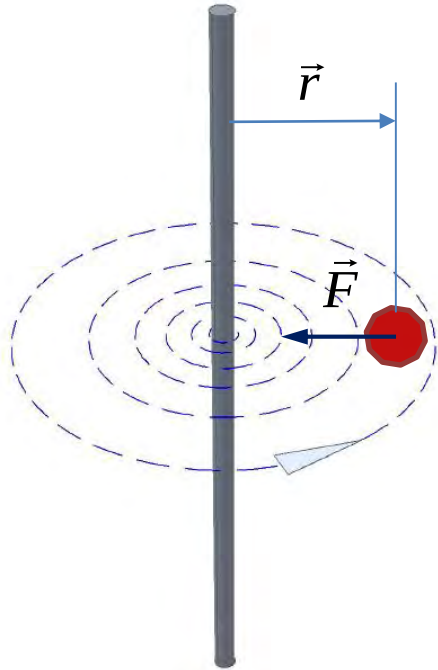


На рисунке представлен результат численного моделирования эволюции клубка квантовой турбулентности, первоначально сосредоточенного в кубической области с прозрачными стенками.

Расчеты показывают, что **распад квантовой турбулентности вызван вылетанием ("испарением") вихревых колец из первоначального объема.** Отчетливо видно множество мелких вихревых колец, которые вылетают из первоначального объёма в разных направлениях.

Kondaurova L., Nemirovskii S. K. Numerical study of decay of vortex tangles in superfluid helium at zero temperature // Phys. Rev. B. 2012. Oct. V. 86. P. 134506.

Сила действующая на твёрдую частицу со стороны квантовой вихревой нити



Давление сверхтекучей жидкости вблизи прямолинейной квантовой вихревой нити (1):

$$P = P_{\infty} - \frac{\rho_s \hbar^2}{2m^2 r^2} \quad (1)$$

Потенциальная энергия твёрдой частицы малых размеров вблизи вихревой нити (2):

$$E = E_{\infty} - V \frac{\rho_s \hbar^2}{2m^2 r^2} \quad (2)$$

Сила, действующая на твёрдую частицу со стороны квантовой вихревой нити (3):

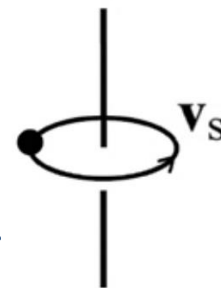
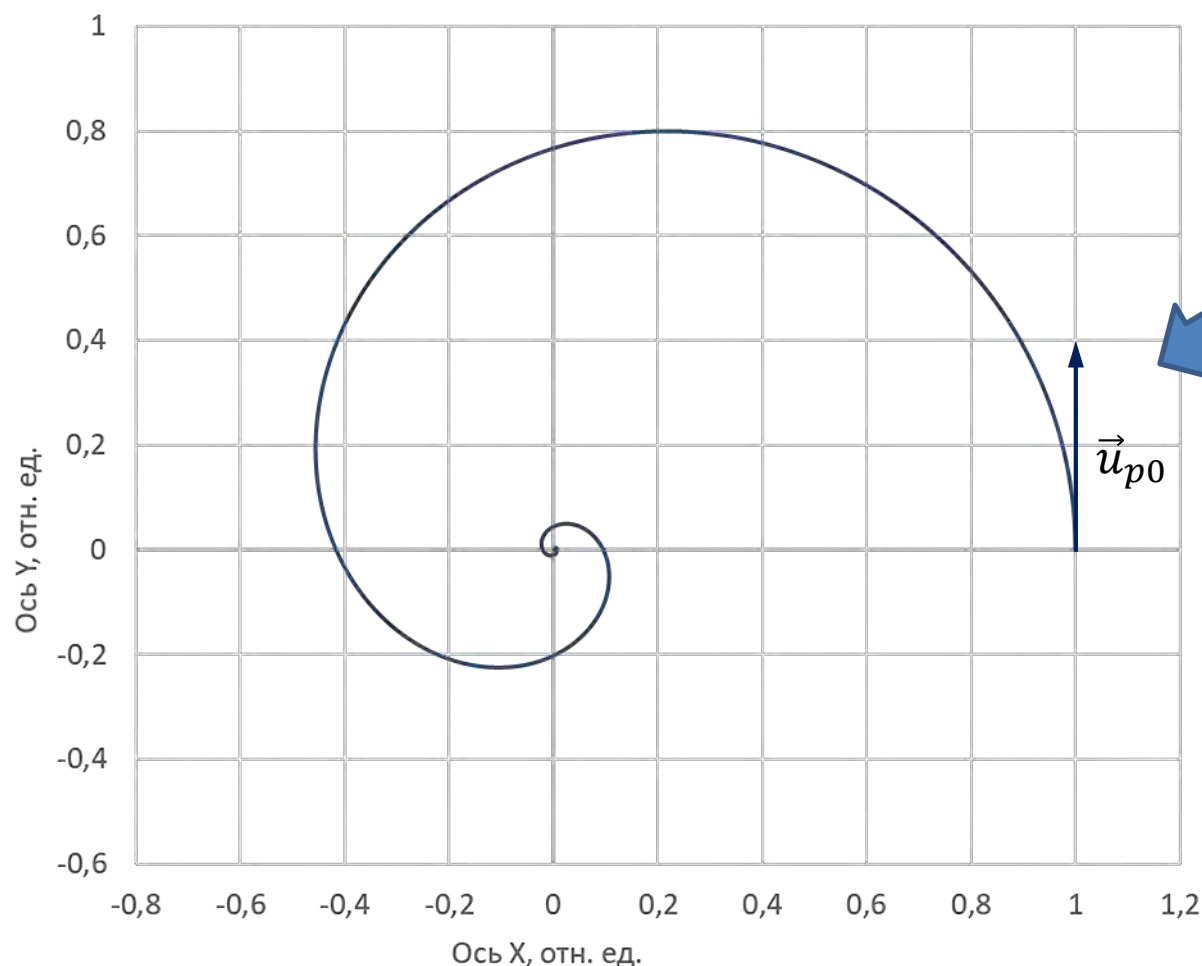
$$\vec{F} = -V \frac{\rho_s \hbar^2}{m^2 r^4} \vec{r} \quad (3)$$

где r – расстояние от оси квантовой вихревой нити,
 V - объём твёрдой частицы.

А. В. Чистилинов Механизм образования треков странного излучения. Доклад на РКХТЯиШМ-27 06.10.2022.

М. S. Paoletti, R. B. Fioroto, K. R. Sreenivasan, and D. P. Lathrop Visualization of Superfluid Helium Flow J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) 111007.

Траектория движения твёрдой частицы в поле квантовой вихревой нити при отсутствии диссипации

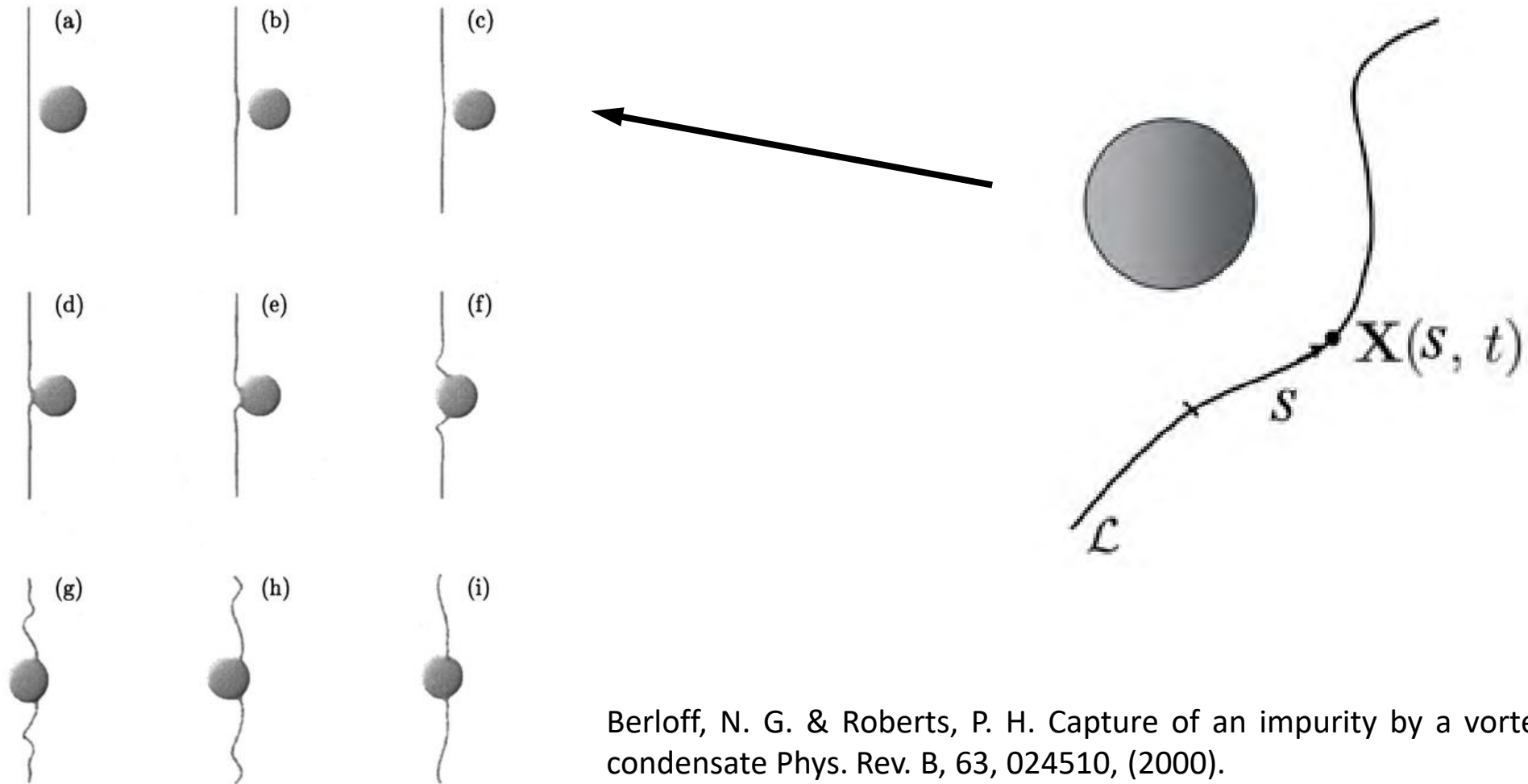


Уравнение движения твёрдой частицы
в поле квантовой вихревой нити при
отсутствии трения (4):

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = -q \frac{\vec{r}}{r^4} \quad (4)$$

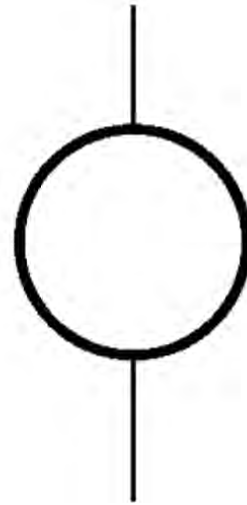
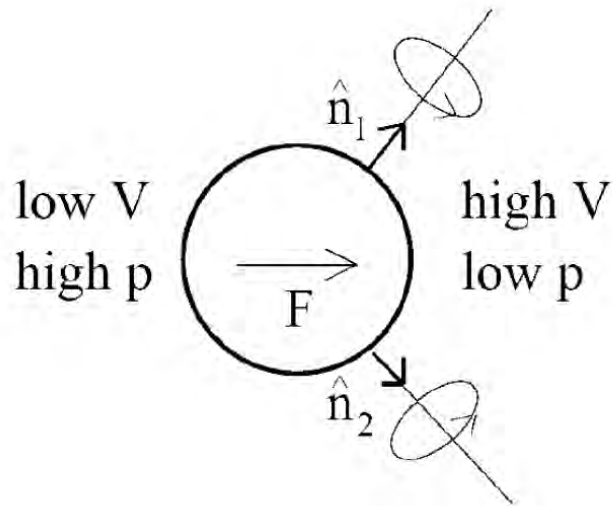
где $\vec{u}_p$ - скорость твёрдой частицы квинтэссенции,
 $\vec{r}$ - координата твёрдой частицы квинтэссенции,
 M_p - масса твёрдой частицы квинтэссенции,
 $q = \frac{v \rho_s \hbar^2}{M_p m^2}$ - константа, характеризующая
 взаимодействие твёрдой частицы квинтэссенции и
 квантовой вихревой нити,
 $\vec{u}_{p0}$ - начальная скорость твёрдой частицы
 квинтэссенции, равна 0,9 скорости круговой траектории.

Присоединения твёрдой частицы к квантовой вихревой нити в сверхтекучем гелии



Berloff, N. G. & Roberts, P. H. Capture of an impurity by a vortex line in a Bose condensate Phys. Rev. B, 63, 024510, (2000).

Квантовые вихревые нити на поверхности твёрдой частицы



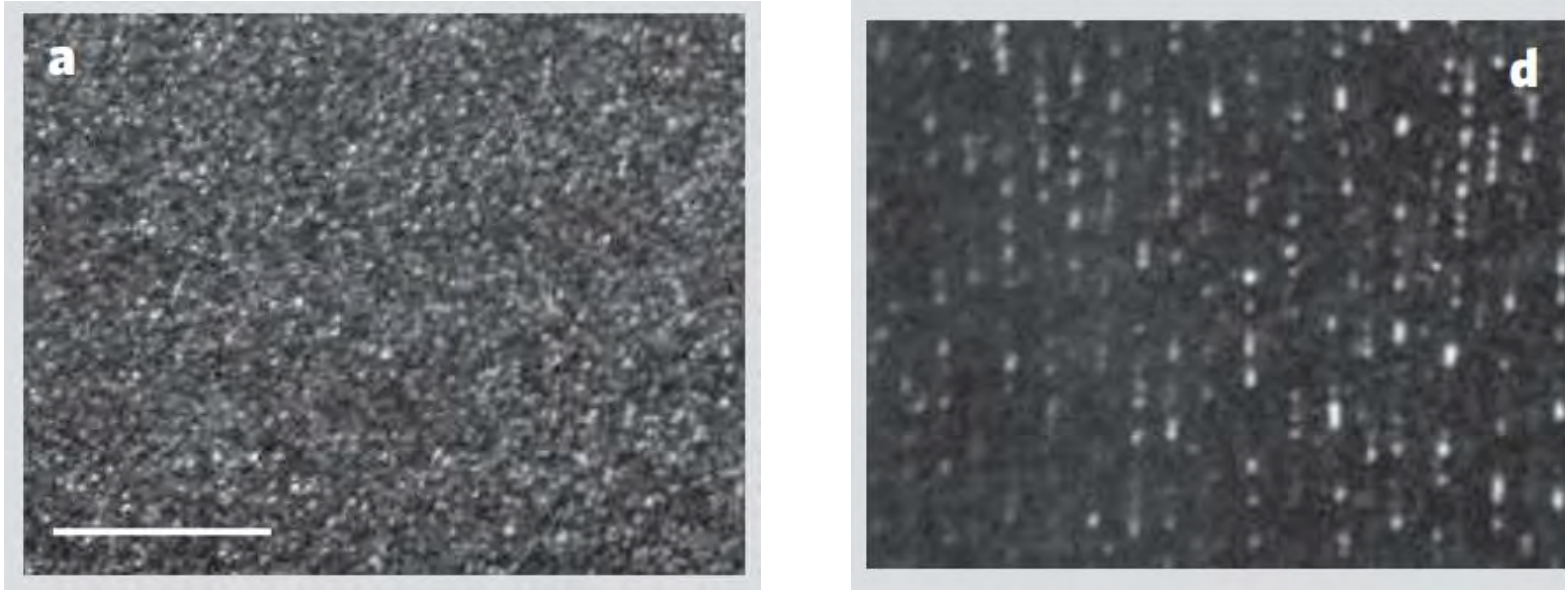
Потенциальная энергия твёрдой частицы квинтэссенции, захваченной квантовой вихревой нитью (5):

$$E = -\frac{2\pi\rho_s\hbar^2 a_p}{m^2} \ln \frac{2a_p}{a_0} \quad (5)$$

где a_p - радиус твёрдой частицы,
 a_0 - радиус квантовой вихревой нити,
 ρ_s - плотность сверхтекучей компоненты,
 m - масса элементарной частицы квинтэссенции.

Sergeev, Y. A. & Barenghi, C. F. Particles-Vortex Interactions and Flow Visualization in 4 He. Journal of Low Temperature Physics. 157. 429-475. (2009).

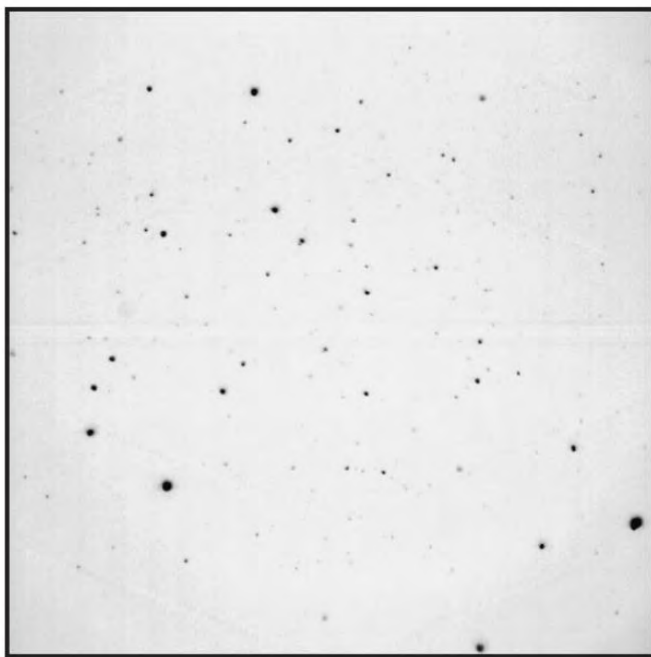
Визуализация квантовых вихревых нитей в сверхтекучем гелии с помощью частиц твёрдого водорода



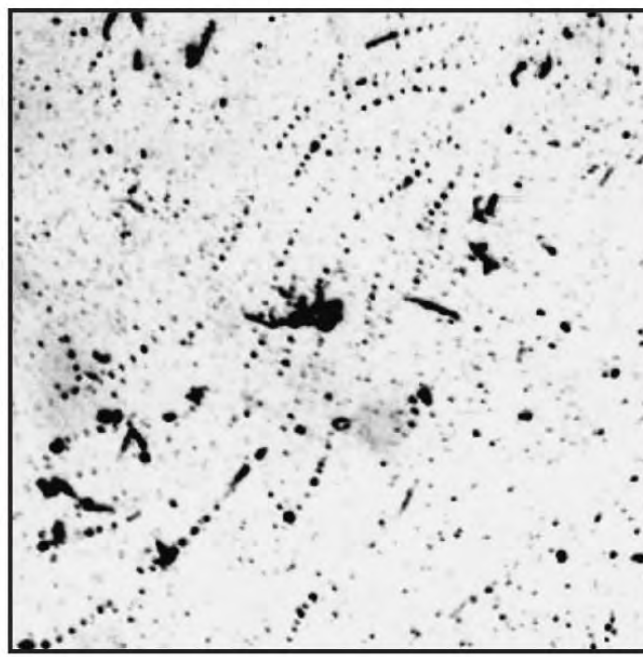
Частицы твёрдого водорода во вращающемся гелии: а - при температуре выше λ -точки=2,172 К, d - при температуре ниже λ -точки. Длина масштабной линии – 1мм.

Bewley G., Lathrop D., Sreenivasan K. Superfluid helium — visualization of quantized vortices // Nature. 2006. V. 441. P. 558.

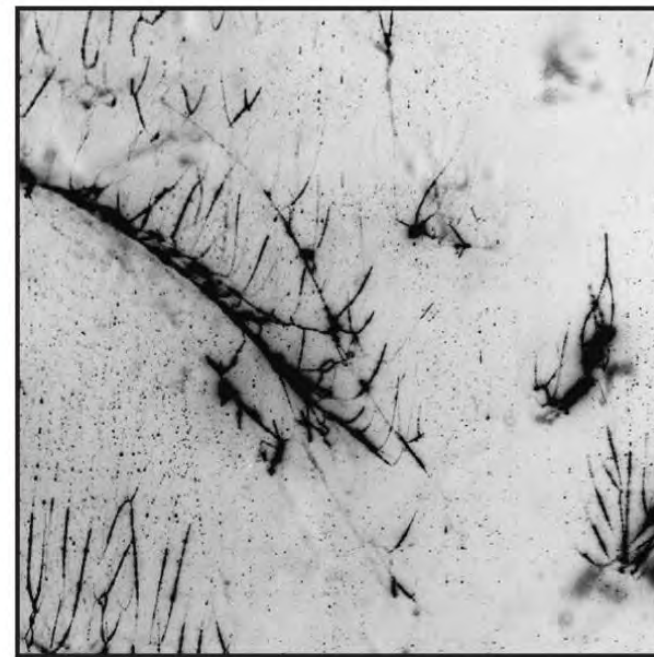
Влияние твёрдых частиц на квантовые вихревые нити в сверхтекучем гелии



(a)



(b)



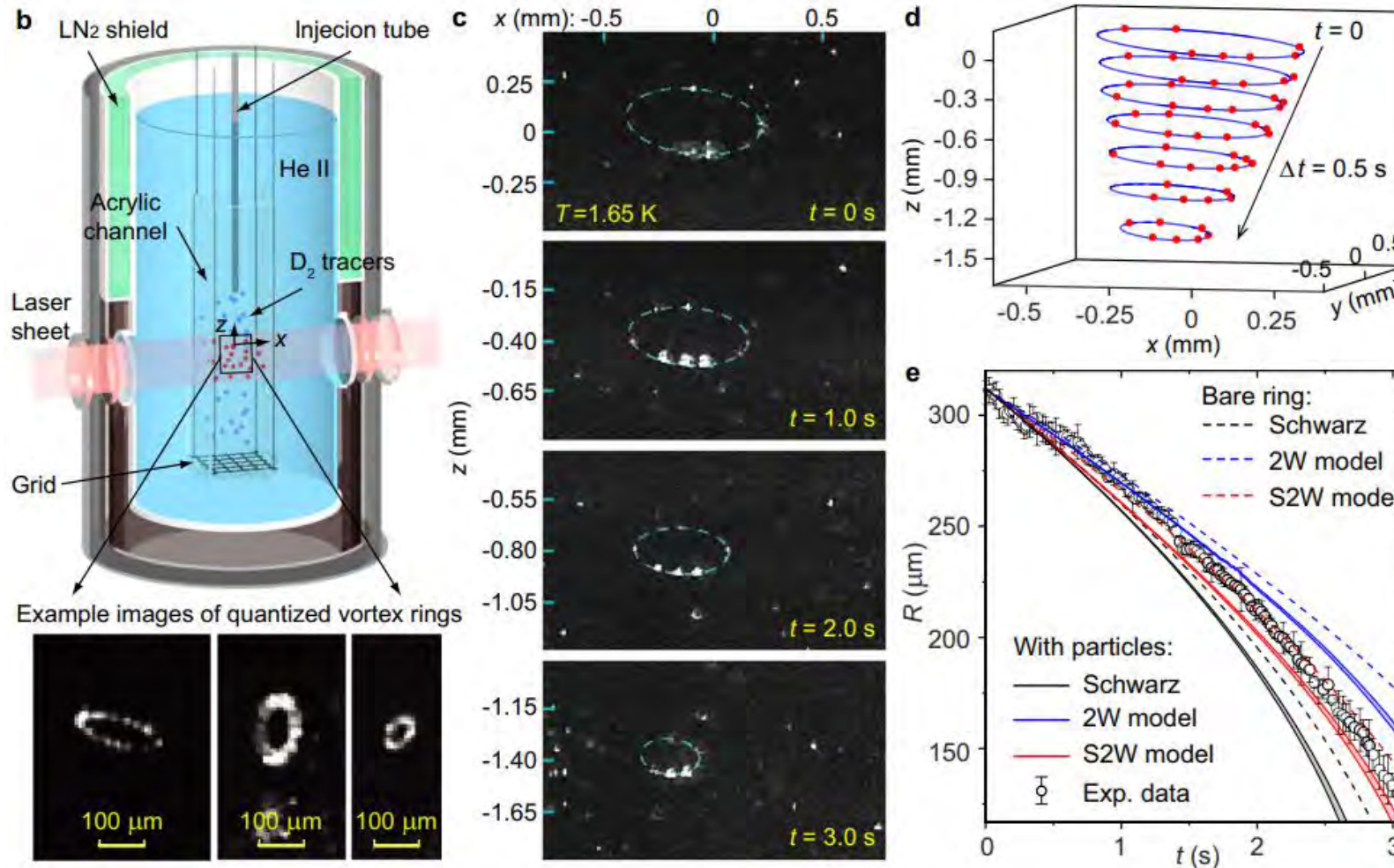
(c)

(a) Наименьшая объемная доля водорода ($\phi_{H_2}/\phi_{He} < 10^{-8}$). (б) умеренная объемная доля водорода ($10^{-8} < \phi_{H_2}/\phi_{He} < 10^{-6}$), которая часто приводит к тому, что в каждом видимом вихре оказывается несколько частиц, захваченных в ловушку. В таких случаях захваченные частицы, как правило, равномерно распределены вдоль ядра вихря. (c) более экстремальные эффекты очень больших объемных долей водорода ($10^{-5} < \phi_{H_2}/\phi_{He}$). Полностью занимая ядро квантованного вихря, водород может служить для стабилизации ветвей и сетей вихрей, которые должны быть нестабильными в их отсутствие.

M. S. Paoletti, R. B. Fioroto, K. R. Sreenivasan, and D. P. Lathrop Visualization of Superfluid Helium Flow J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) 111007.



Визуализация квантовых вихревых колец с помощью частиц твёрдого водорода в сверхтекучем гелии



b Принципиальная схема экспериментальной установки. **c** Изображения, показывающие частицы D₂ (белые точки), захваченные движущимся вихревым кольцом в неподвижном He II.

d Полученный профиль вихревого кольца с захваченными частицами (красные точки) в разное время. **e** Сравнение наблюдаемой эволюции радиуса кольца $R(t)$ с предсказаниями модели.

Tang, Y., Guo, W., Kobayashi, H. et al. Imaging quantized vortex rings in superfluid helium to evaluate quantum dissipation. Nat Commun 14, 2941 (2023).

III. Теория странного излучения

Классификация треков известных излучений по поколениям

1. **Первичное излучение** - образует **трек** вдоль всей траектории исходной частицы (пример: α -, β - излучение).
2. **Вторичное излучение** – генерируется первичным излучением, образует **треки**, начинающиеся от случайных точек на траектории исходной частицы и могут иметь любую направленность (пример: δ - излучение).
3. **Третичное излучение** – генерируется вторичным излучением, образует **треки**, которые могут не иметь общих точек с траекторией исходной частицы и могут иметь любую направленность (пример: ε - излучение).

Первичные нейтральные частицы не образуют треков (пример: γ - излучение, нейтроны) – в трековых детекторах они обнаруживаются по трекам вторичного излучения, при условии, что частицы вторичного излучения - заряженные. Если частицы вторичного излучения также нейтральны, то они могут быть обнаружены по трекам третичного излучения, если его частицы имеют заряд. И так далее ...

Сложный характер странного излучения

1. Странное излучение с одной стороны обладает высокой проникающей способностью, а с другой сильно взаимодействует с материалом трековых детекторов.
2. Отсутствует связь между направлением движения странного излучения в воздухе и направлением трека на поверхности твердотельного детектора.

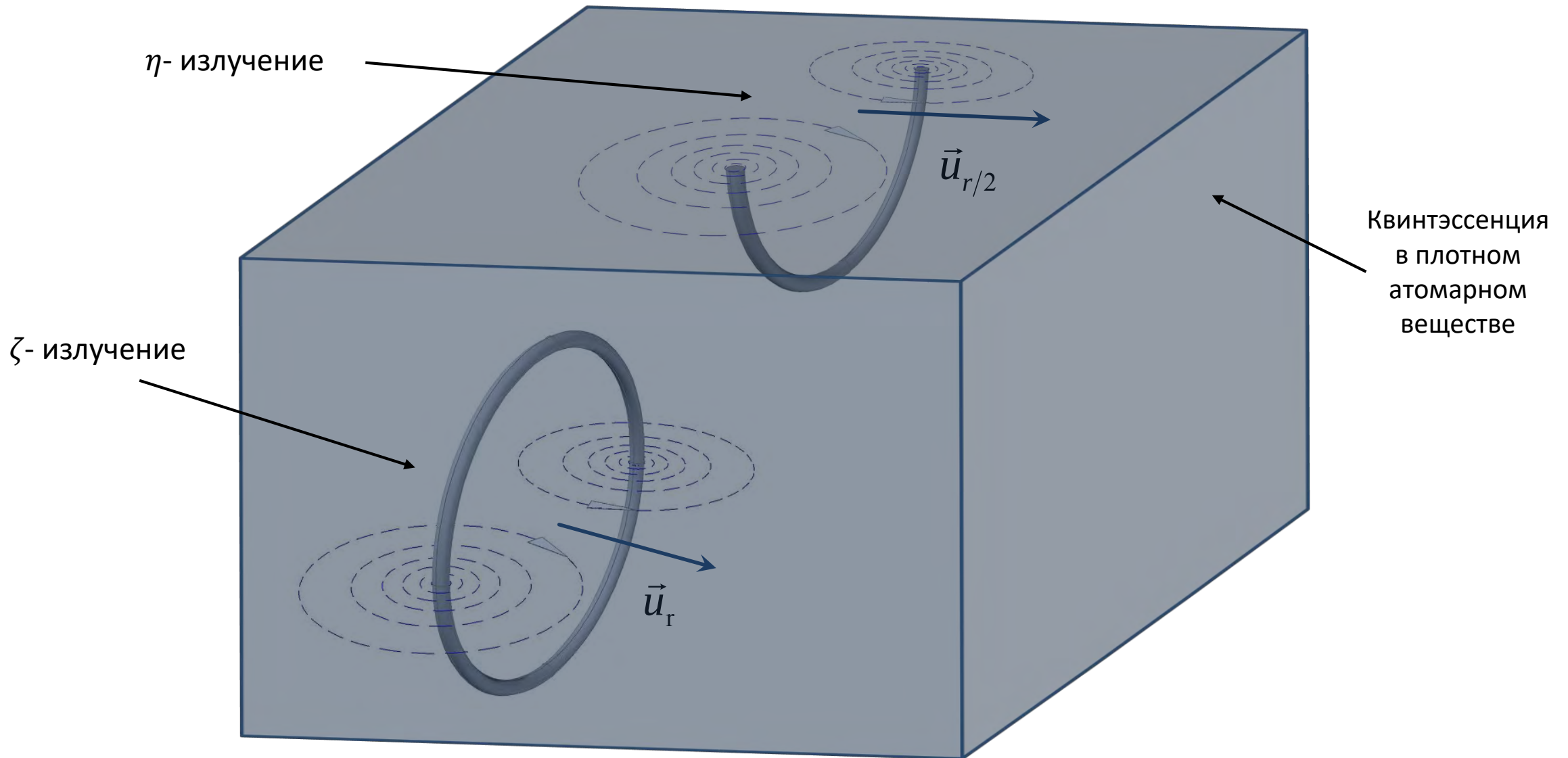
Оба этих факта указывают на то, что трек странного излучения создаётся вторичным излучением или излучением более старшего поколения. При этом первичное излучение должно обладать высокой проникающей способностью, а излучение, оставляющее трек – нет.

Классификация частиц странного излучения

Введём следующую терминологию, будем называть:

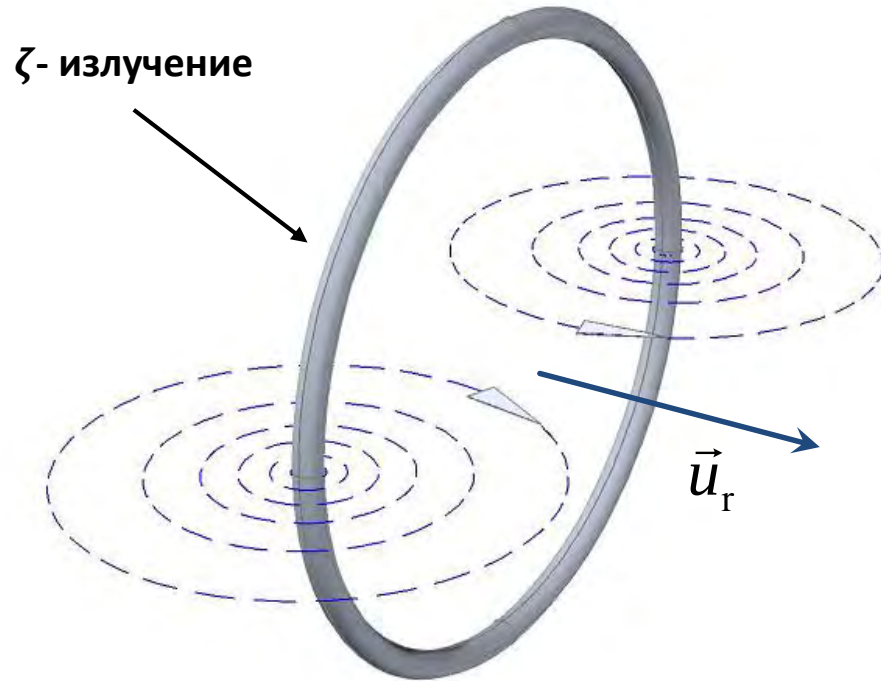
- 1. ζ - (дзета) излучением - первичное странное излучение,**
- 2. η - (эта) излучением - вторичное странное излучение,**
- 3. θ - (тета) или θ' - (тета штрих) излучением - третичное странное излучение, которое оставляет треки на твердотельных детекторах.**

ζ - и η - излучение в плотном атомарном веществе согласно модели



1) ζ - (дзета) излучение

ζ -излучение в плотном атомарном веществе*



Будем называть ζ - (дзета) излучением в объёме квинтэссенции - квантовые вихревые кольца.

ζ - излучение генерируется непосредственно квантовой турбулентностью, способы генерации которой в квинтэссенции рассматривались в докладе**, это: большие градиенты температуры в веществе, турбулентные течения при высоких скоростях, ударные волны.

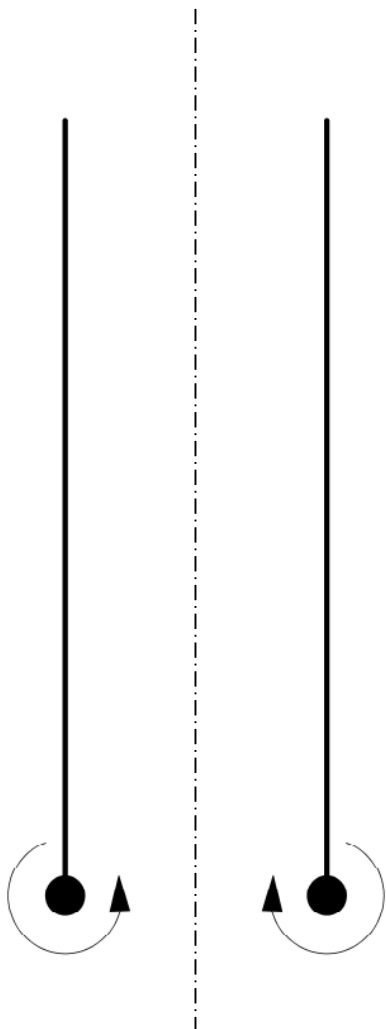
ζ - излучение не оставляет треков в твердотельных детекторах.

* Чистилинов А.В. Эмиссия вещества с поверхности шаровой молнии и проблема “странного” излучения. Доклад на РКХТЯиШМ-25 2018.

Чистилинов А.В. О природе странного излучения. Доклад на РКХТЯиШМ-27 2022.

**Чистилинов А.В. Доклад на семинаре «Высокоэнергетические процессы в конденсированных средах» 14.06.2023.

Вихревая пара точечных вихрей в бесконечном пространстве*



Полезным модельным объектом для исследования вихревых структур является **точечный вихрь** в идеальной жидкости в двумерном пространстве.

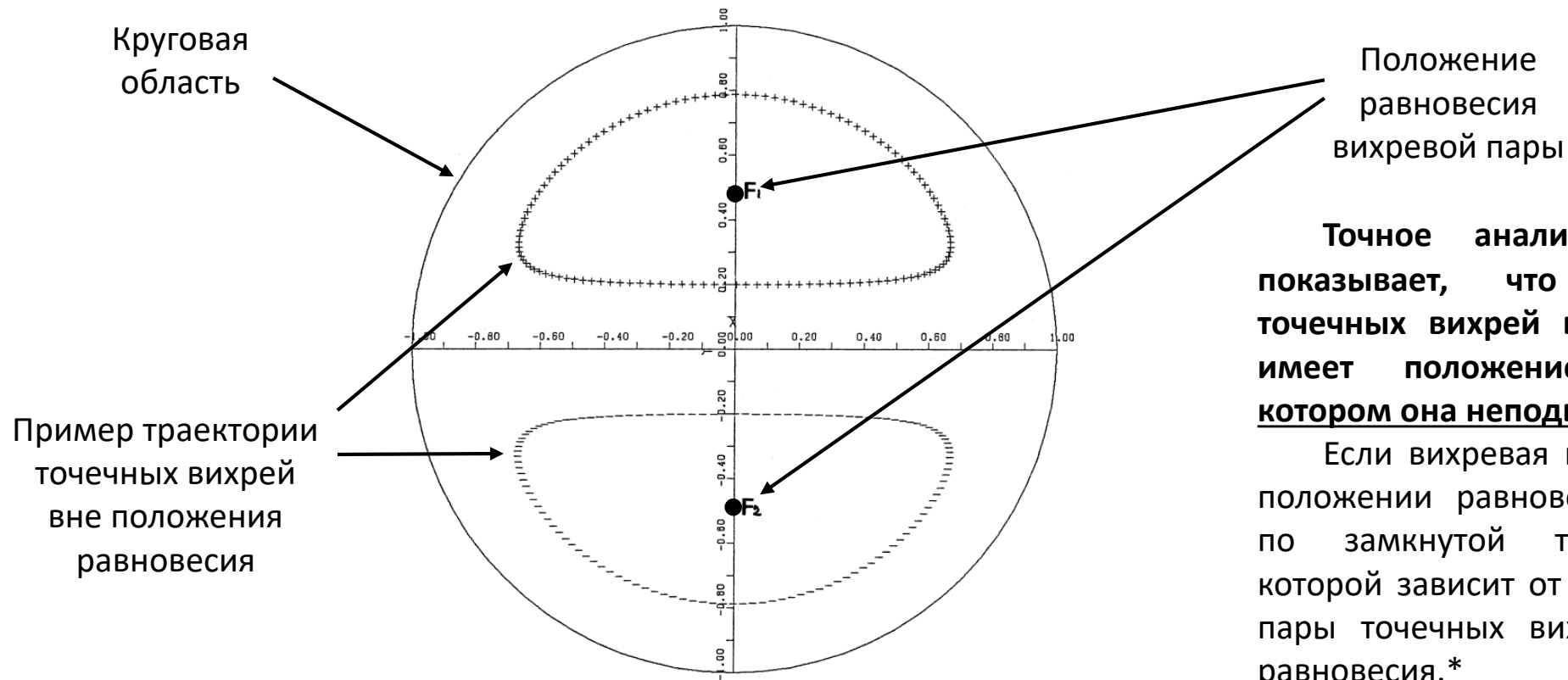
Два точечных вихря с равными по модулю, но противоположными по знаку значениями циркуляции образуют вихревую пару.

Такая вихревая пара в бесконечном пространстве при отсутствии других вихрей, в покоящейся идеальной жидкости **будет двигаться прямолинейно с постоянной скоростью** перпендикулярно отрезку, соединяющему центры этих вихрей.

На рисунке показана вихревая пара точечных вихрей в начальный момент времени и траектория их движения.

*Мелешко В.В., Константинов М.Ю. Динамика вихревых структур. Киев: Наук. думка, 1993. 279 с.

Вихревая пара точечных вихрей в круговой области



Точное аналитическое решение показывает, что вихревая пара точечных вихрей в круговой области имеет положение равновесия, в котором она неподвижна.

Если вихревая пара не находится в положении равновесия, она движется по замкнутой траектории размер которой зависит от степени отклонения пары точечных вихрей от положения равновесия.*

*Kimura, Y., Kusumoto, Y., & Hasimoto, H. *Some Particular Solutions for Symmetric Motion of Point Vortices in a Circular Cylinder. J. Phys. Soc. Japan*, 1984, 53(9), 2988–2995.

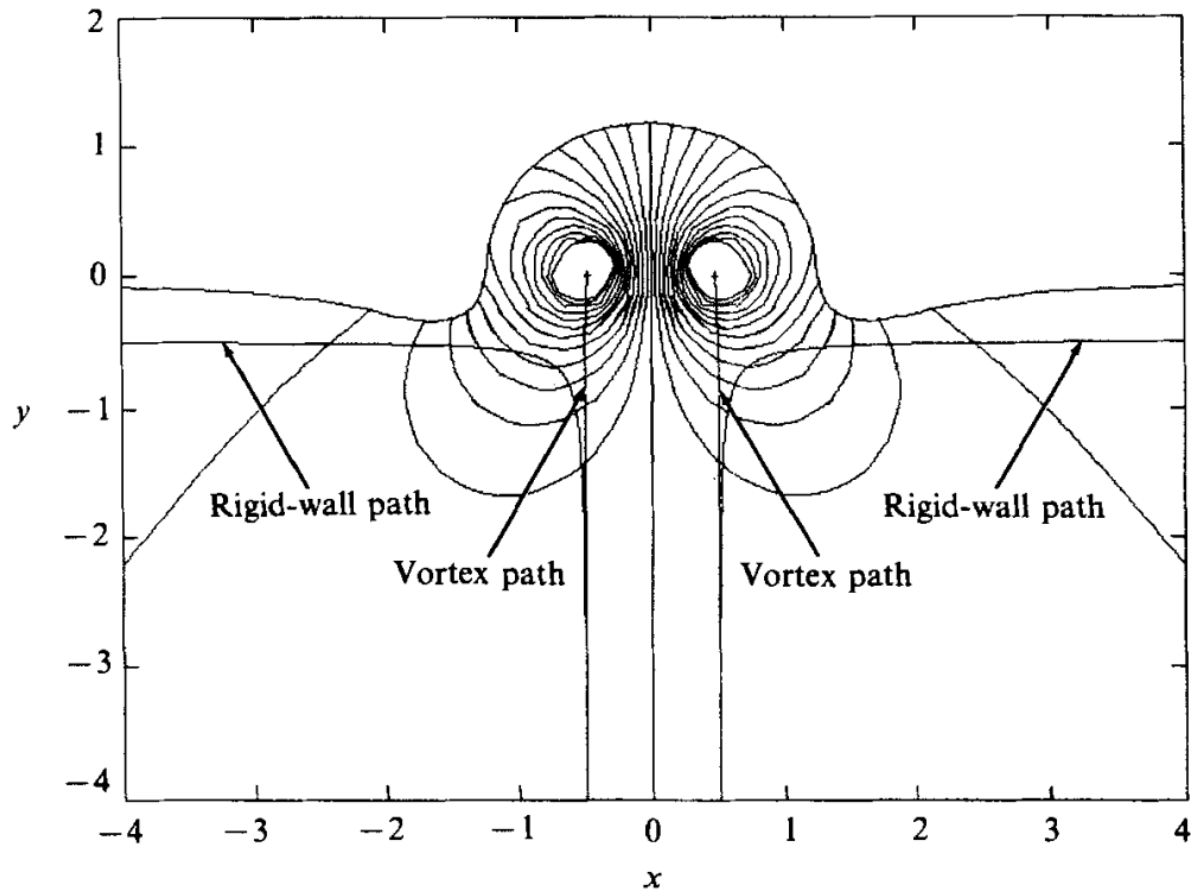
ζ -излучение в воздухе*



В воздухе при нормальных условиях ζ - излучение может существовать в виде капель квинтэссенции, содержащих квантовые вихревые кольца. При определённом соотношении размеров капли и квантового вихревого кольца в капле квинтэссенции существует положение равновесия в котором вихревое кольцо остаётся неподвижным. В таком положении **квантовое вихревое кольцо не теряет энергию, а значит может существовать в течение длительного времени.**

*А. В. Чистилинов О природе странного излучения.
Доклад на РКХТЯиШМ-27 2022.

Взаимодействие пары точечных вихрей в жидкости со свободной поверхностью приводящее к выбросу капли



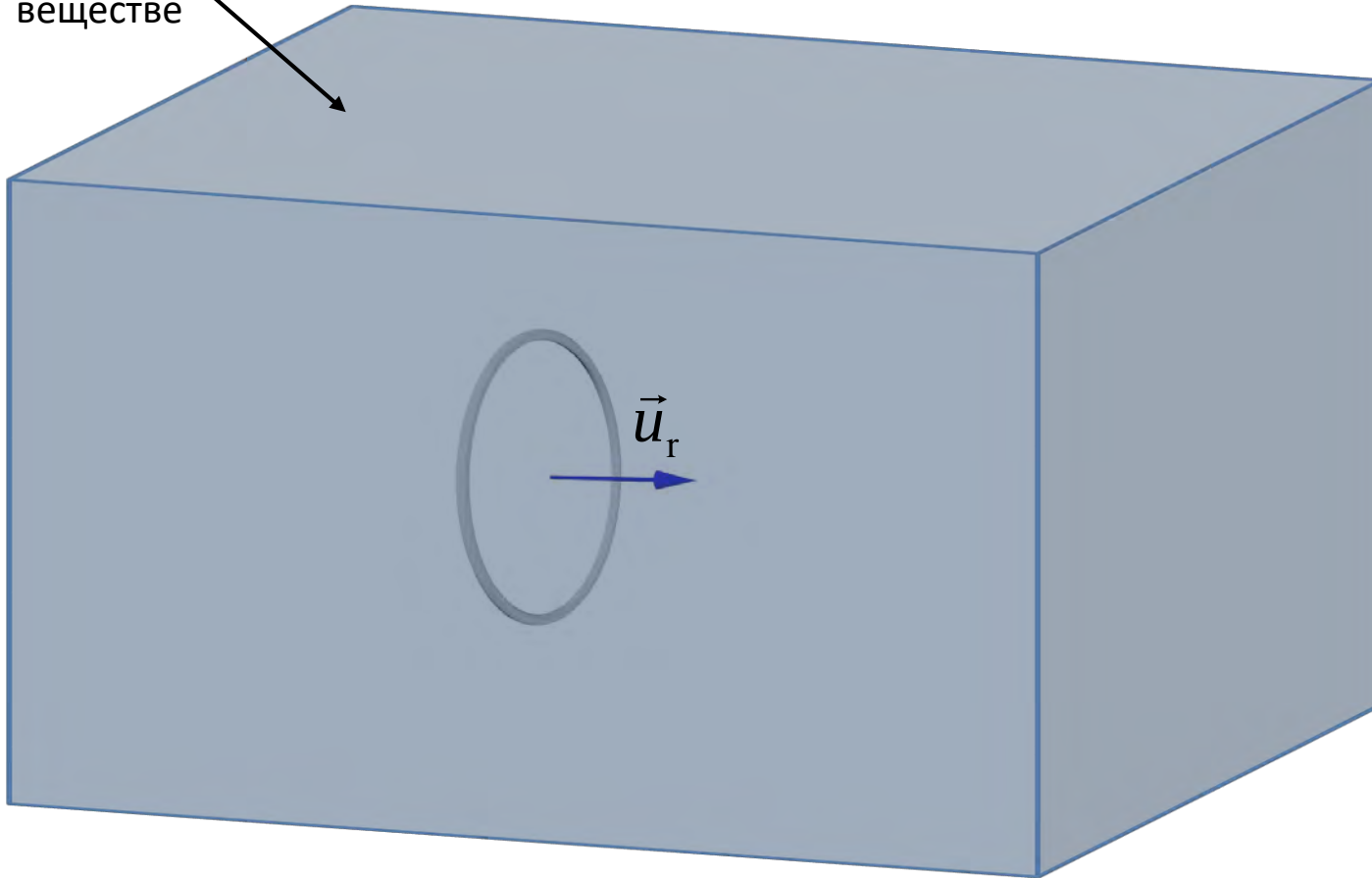
Влияние силы тяжести на деформацию свободной поверхности жидкости характеризуется числом Фруда (Fr).

На рисунке представлен результат численного моделирования взаимодействия пары точечных вихрей со свободной поверхностью жидкости в поле тяжести при $Fr \gg 1$. Показана траектория вихревой пары до определённого момента времени в сравнении с траекторией вихревой пары при наличии твёрдой стенки. Видно, что вихревая пара при этих условиях движется практически прямолинейно и, приблизившись к свободной поверхности «выпрыгивает» из воды, образуя каплю. *

*Telste J.G. Potential flow about two counter-rotating vortices approaching a free surface // J. Fluid Mech. 1989. V. 201. P. 259-278.

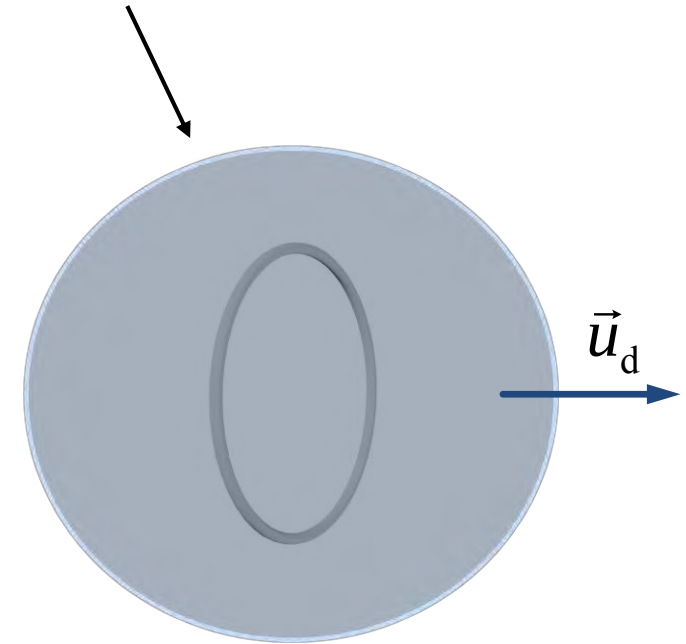
Переход ζ -излучения из плотного атомарного вещества в воздух

Квинтэссенция в
плотном атомарном
веществе



ζ -излучение в плотном веществе, $\vec{u}_r$ - скорость квантового вихревого кольца.

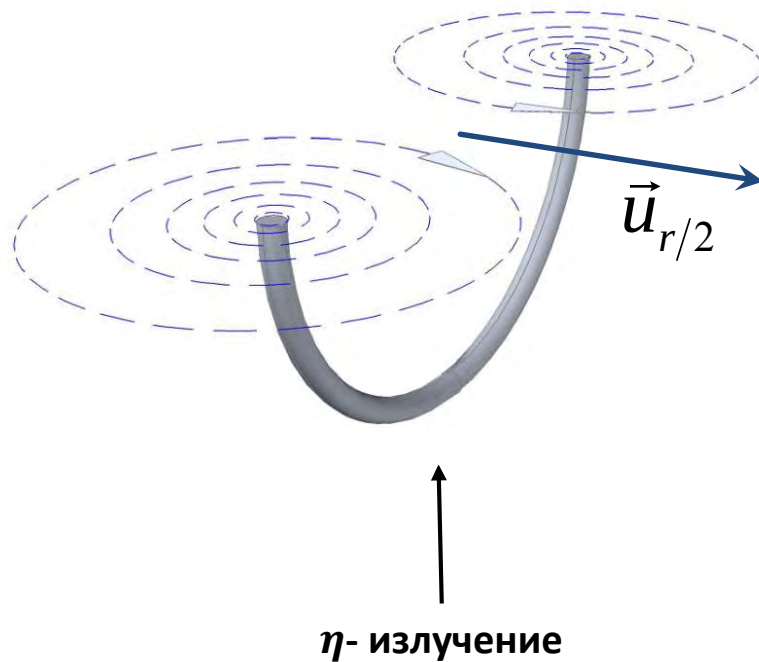
Капля квинтэссенции
в воздухе



ζ -излучение в воздухе,
 $\vec{u}_d$ - скорость капли
квинтэссенции.

2) η - (эта) излучение

η -излучение в твёрдом теле и в жидкости*



Будем называть η - (эта) излучением квантовые вихревые плукольца замыкающиеся на поверхность квинтэссенции.

Такие объекты возникают в результате взаимодействия ζ - излучения с поверхностью квинтэссенции.

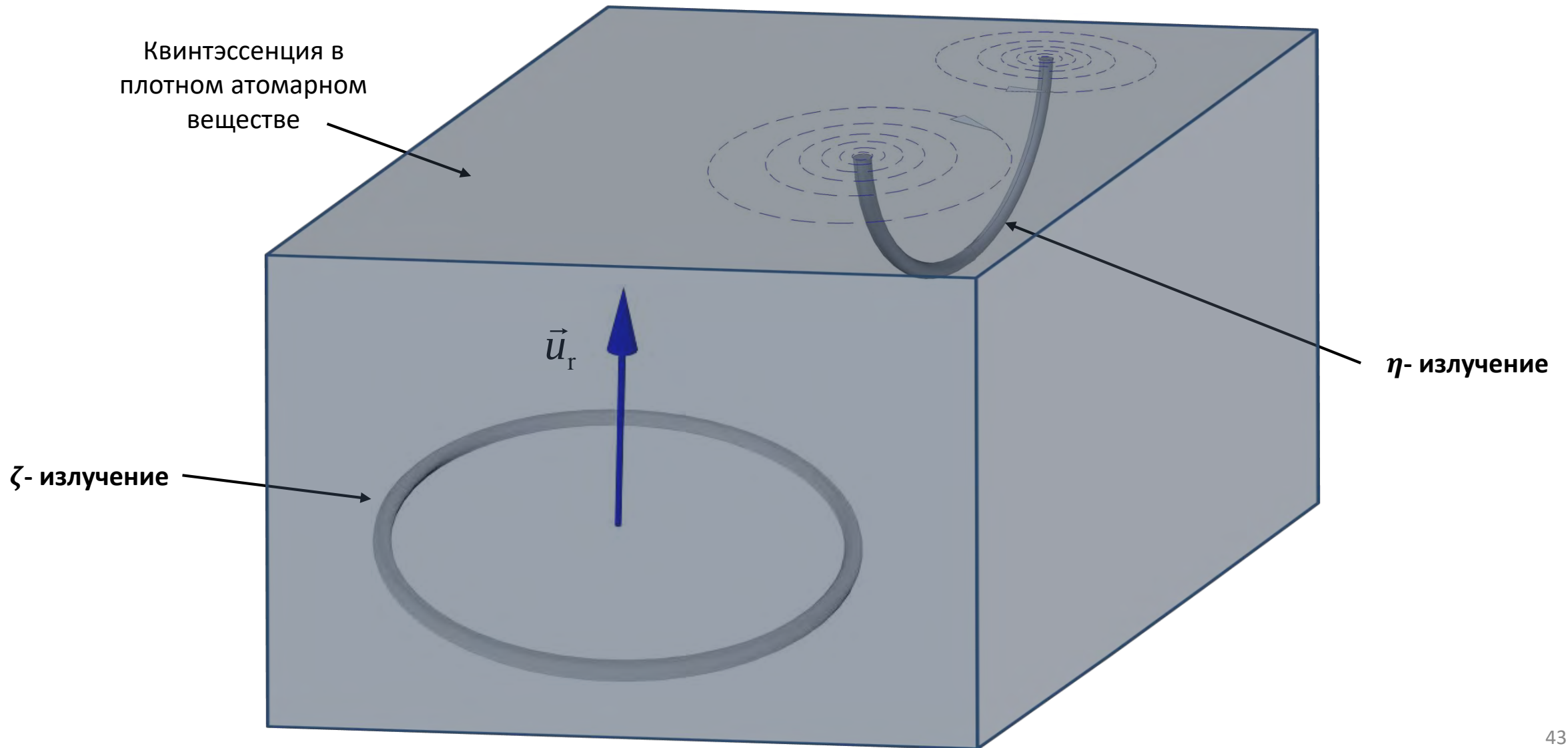
η - излучение не оставляет треков на поверхности твердотельных детекторов.

*Чистолинов А.В. Эмиссия вещества с поверхности шаровой молнии и проблема “странного” излучения.

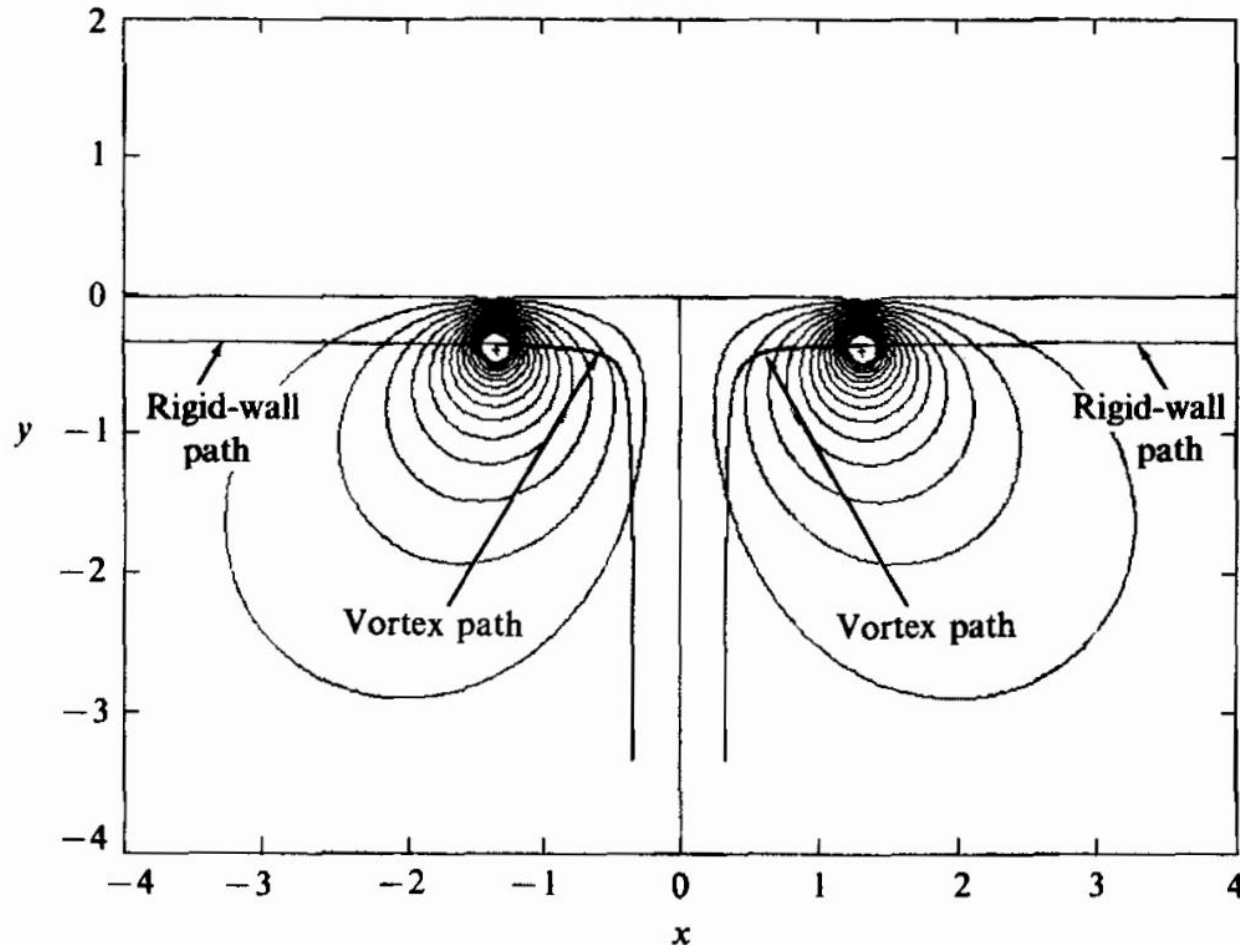
Доклад на РКХТЯиШМ-25 2018.

Чистолинов А.В. О природе странного излучения. Доклад на РКХТЯиШМ-27 2022.

η - излучение образуется при взаимодействии
 ζ - излучения с поверхностью квинтэссенции



Взаимодействие пары точечных вихрей в жидкости со свободной поверхностью приводящее к «растеканию» вдоль поверхности

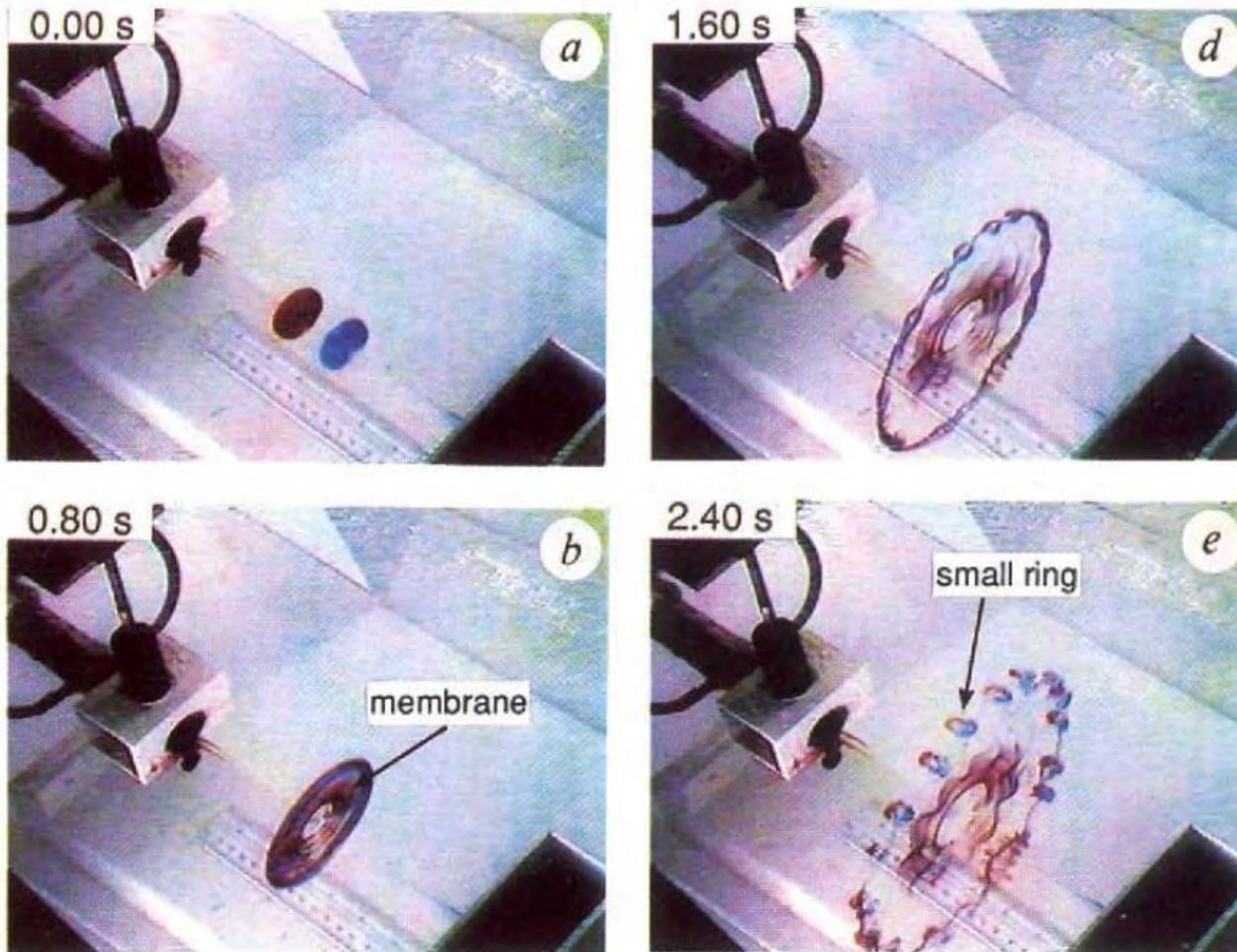


На рисунке представлен результат численного моделирования взаимодействия пары точечных вихрей со свободной поверхностью жидкости в поле тяжести при числе Фруда $Fr \ll 1$. Показана траектория вихревой пары до определённого момента времени в сравнении с траекторией вихревой пары при наличии твёрдой стенки.

Видно, что при $Fr \ll 1$ движение вихревой пары практически не отличается от случая твёрдой стенки *

*Telste J.G. Potential flow about two counter-rotating vortices approaching a free surface // J. Fluid Mech. 1989. V. 201. P. 259-278.

Моделирование образования η -излучения из ζ -излучения в процессе лобового столкновения вихревых колец



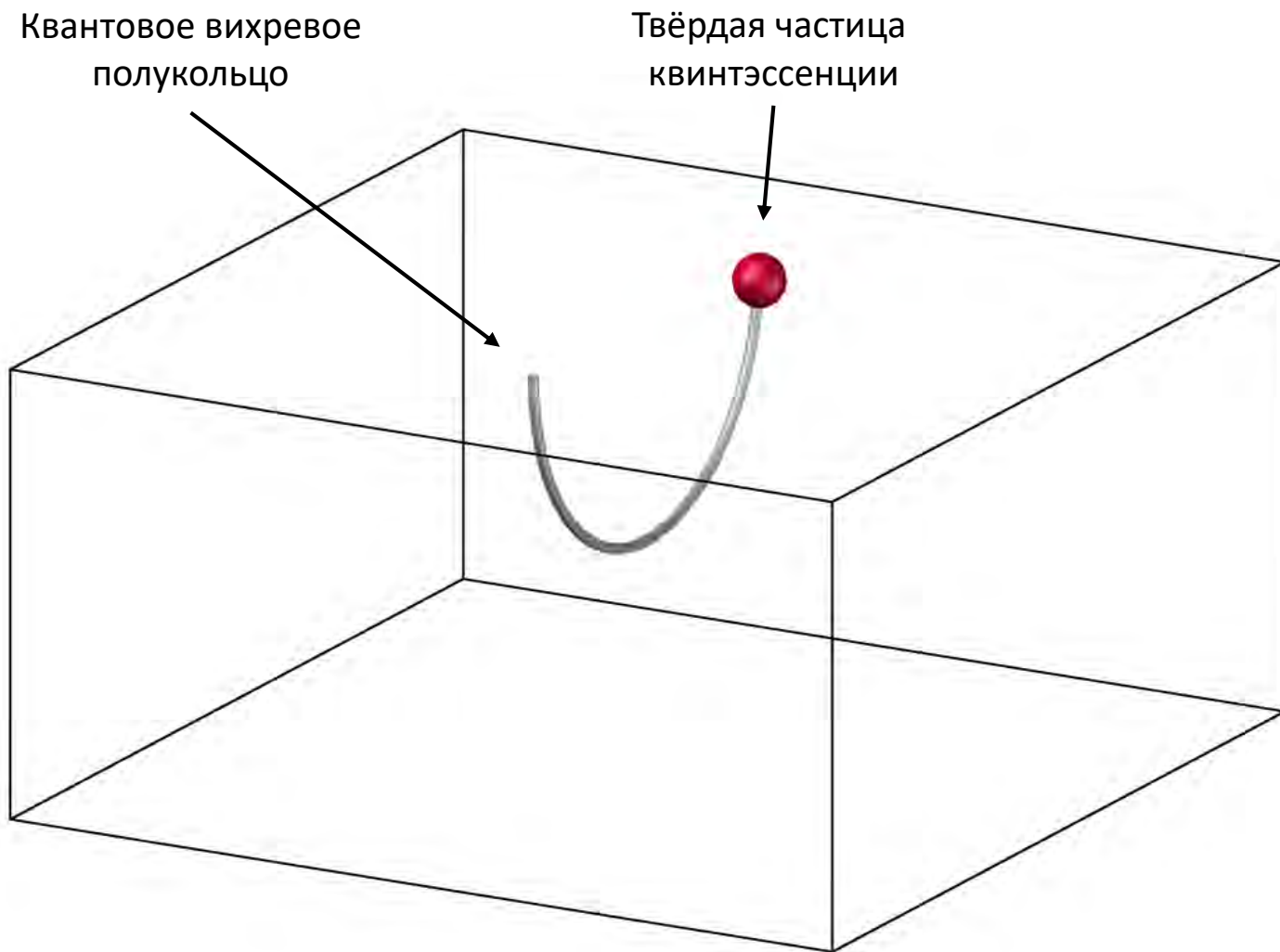
Лобовое столкновение двух вихревых колец в жидкости, подкрашенных красителями разного цвета: а — кольца движутся навстречу друг другу; б — кольца сталкиваются и начинается процесс их расширения; д — происходит нарастание возмущений; е — вихревые нити пересоединяются и образуется множество новых вихревых колец, состоящих из двух половинок разного цвета.*

*Lim, T., Nickels, T. Instability and reconnection in the head-on collision of two vortex rings. *Nature* **357**, 225–227 (1992).

Moroshkin P., Leiderer P., Kono K., Inui S., & Tsubota M. Dynamics of the Vortex-Particle Complexes Bound to the Free Surface of Superfluid Helium. *Phys. Rev. Lett.* **122**, 174502 (2019).

3) θ - (тета) и θ' - (тета штрих)
излучение

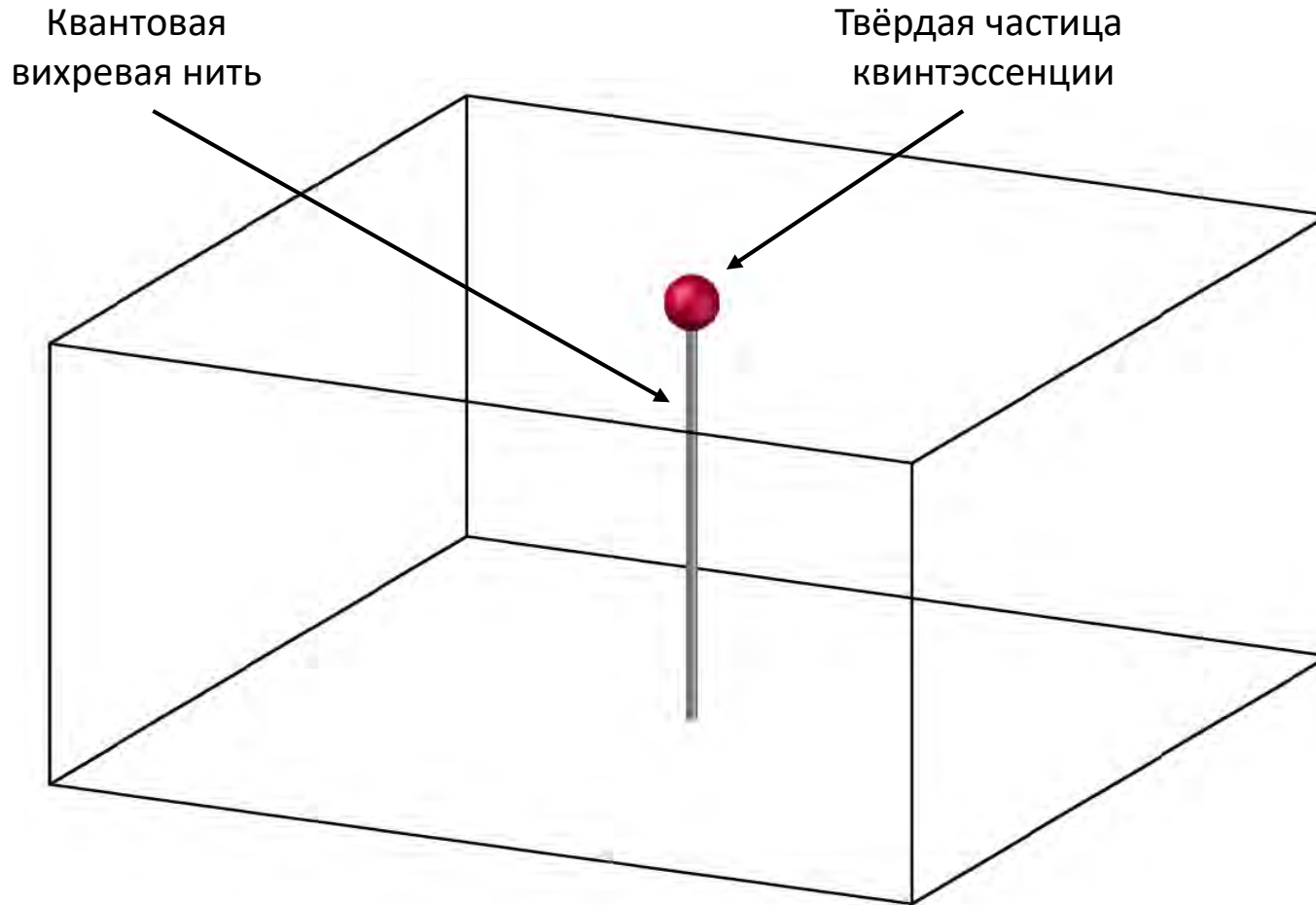
θ – излучение



Будем называть θ - (тета) излучением комплекс, состоящий из квантового вихревого полукольца и захваченной им твёрдой частицы или твёрдых частиц квинтэссенции.

θ - излучение оставляет треки на поверхности твердотельных детекторов. Треки θ - излучения прочерчиваются твёрдыми частицами квинтэссенции, которые захватываются воронками квантовых вихрей на поверхности квинтэссенции, при движении квантового вихревого полукольца вдоль поверхности.

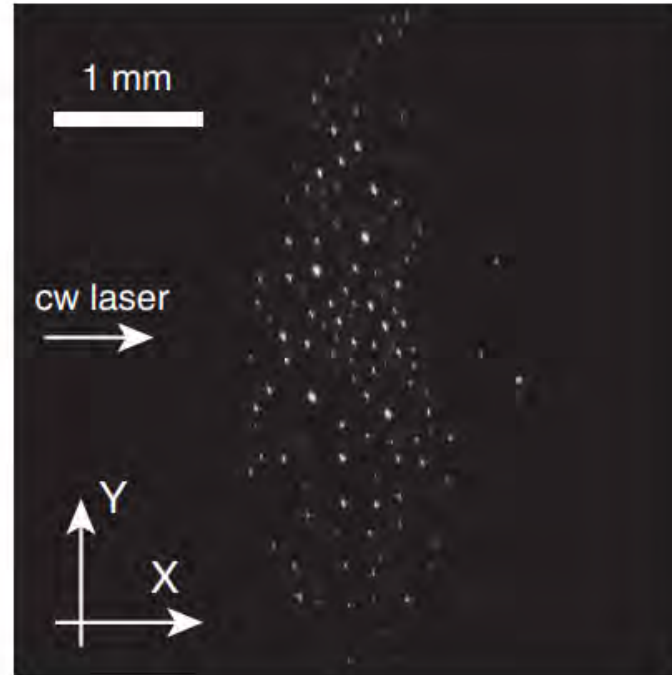
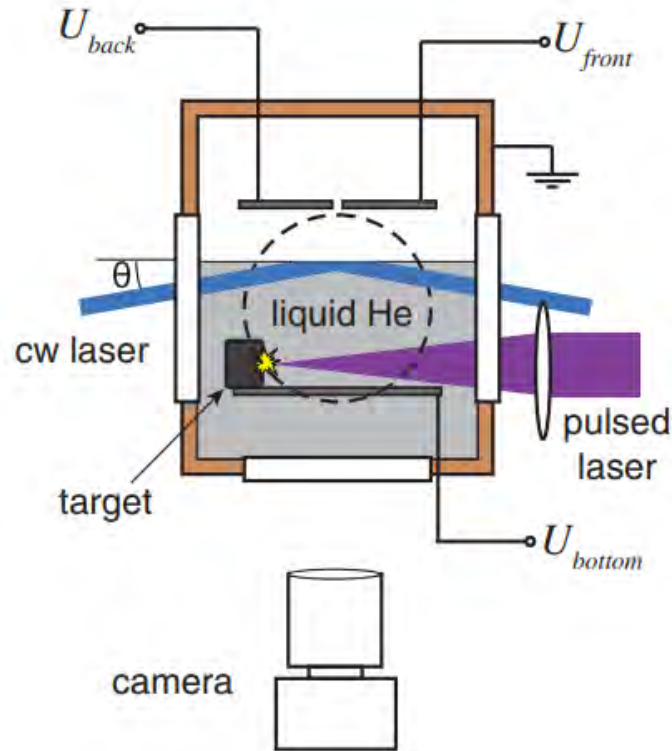
θ' -излучение



Будем называть θ' - (тета штрих) излучением комплекс, состоящий из квантовой вихревой нити, заканчивающейся на поверхности квинтэссенции, и захваченных ей твёрдых частиц квинтэссенции.

θ' -излучение способно оставлять треки на поверхности твердотельных детекторов. Треки θ' -излучения прочерчиваются включениями твёрдой фазы квинтэссенции, которые захватываются квантовой вихревой нитью на поверхности квинтэссенции, при её движении.

Эксперимент с твёрдыми частицами на поверхности сверхтекучего гелия

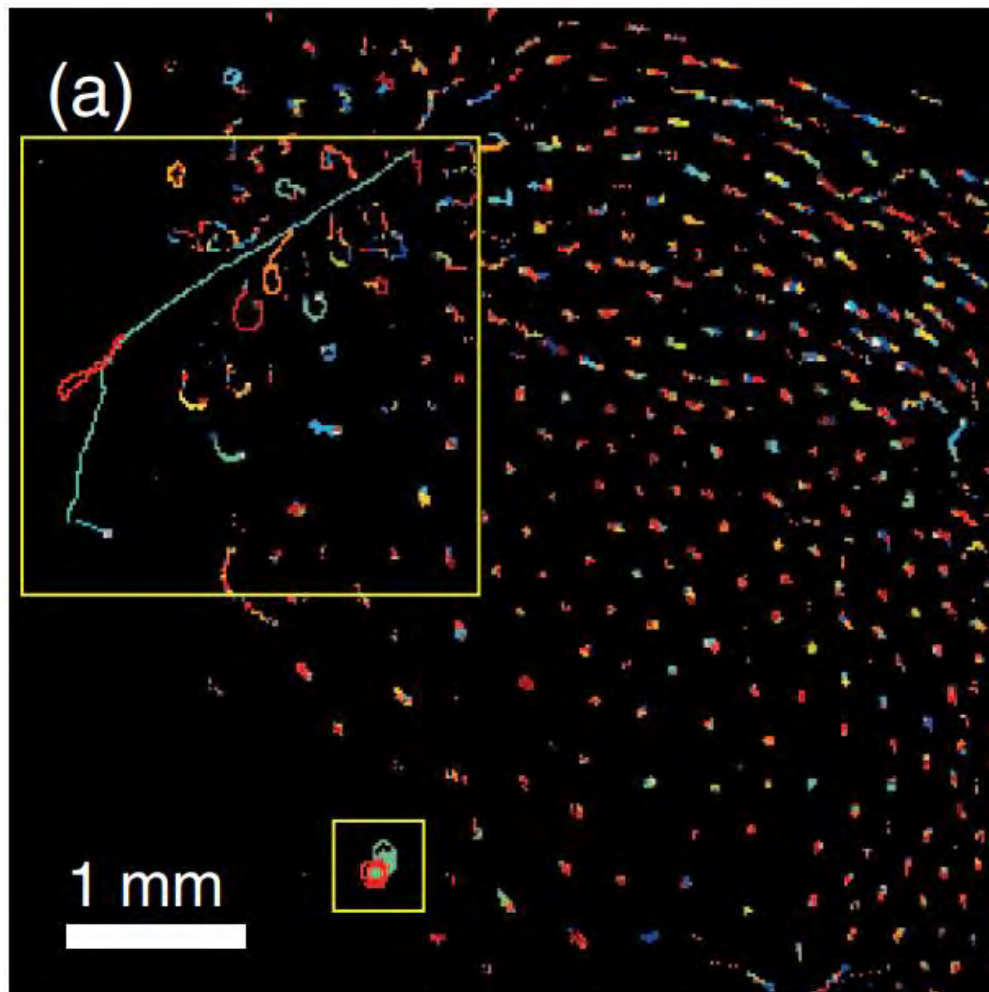


Абляции металлической мишени (Cu, Ba, Dy), погруженной в жидкий He осуществляется с помощью импульсного лазера. **Образующиеся металлические микро- и наночастицы, приобретают электрический заряд** либо в абляционном шлейфе, либо при соприкосновении с нижним электродом. Затем заряженные **частицы поднимаются вверх** под действием электрического поля и скапливаются под свободной поверхностью жидкого He. Для визуализации частиц используется рассеянный свет непрерывного лазера.

Слева – схема экспериментальной установки; справа - типичное изображение захваченных частиц (вид снизу).

Moroshkin P., Leiderer P., Kono K., Inui S., & Tsubota M. Dynamics of the Vortex-Particle Complexes Bound to the Free Surface of Superfluid Helium. Phys. Rev. Lett. **122**, 174502 (2019).

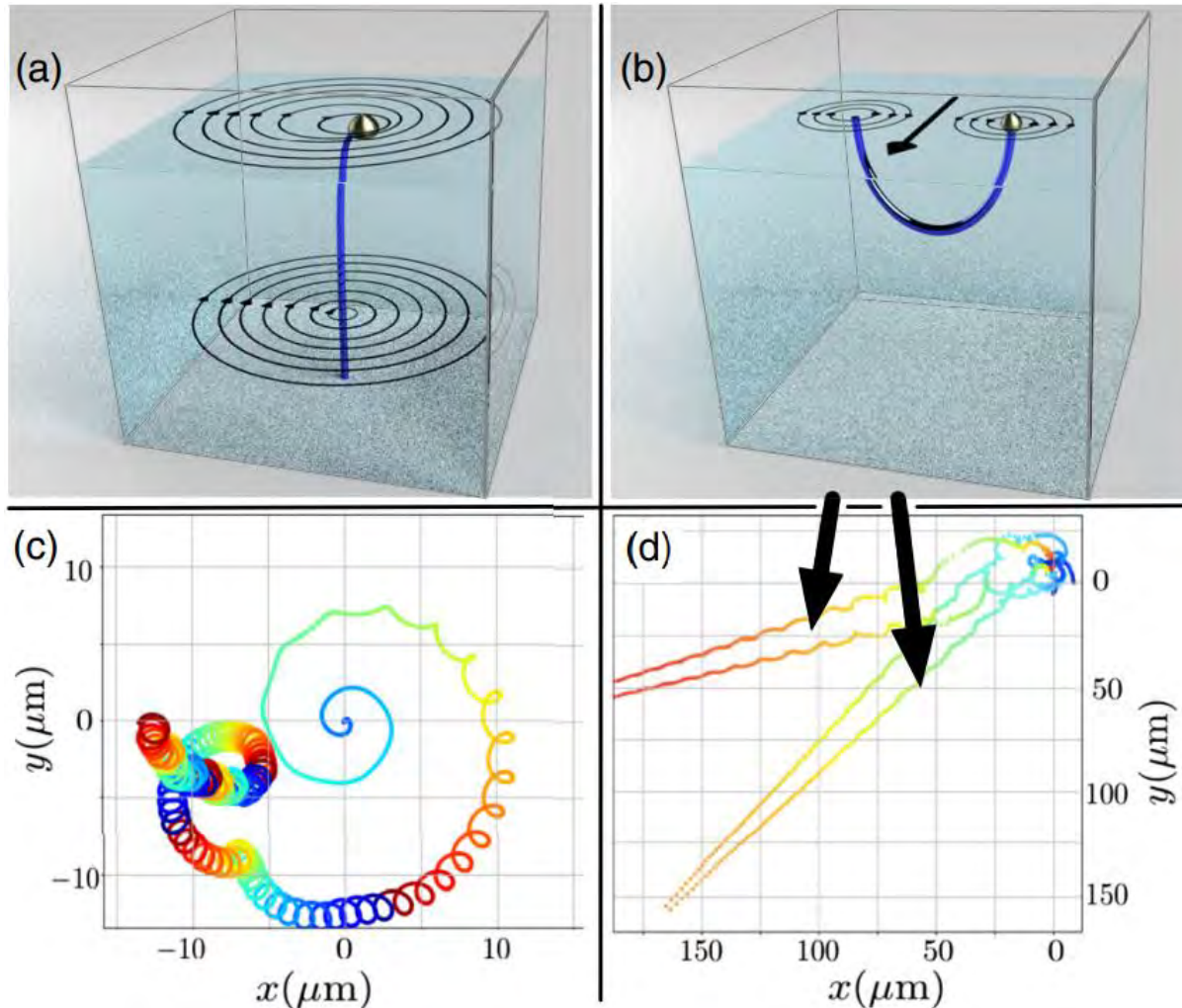
Движение квантовых вихрей заканчивающихся на свободной поверхности сверхтекучего He



На рисунке приведены карты траекторий частиц. Все обычные частицы представлены в виде четко разделенных сгустков, размер которых отражает амплитуды колебаний частиц в направлениях X и Y . Наряду с обычными наблюдается небольшое количество аномальных частиц, движение которых разительно отличается от всех остальных. Можно выделить два типа аномальных частиц. Траектория частиц первого типа представляет собой последовательность круговых циклов - выделенная зона на рисунке внизу слева. Частицы второго типа движутся более или менее прямолинейно с приблизительно постоянными скоростями. Траектория такой частицы обычно состоит из прямых или слегка изогнутых отрезков с резкими поворотами – выделенная зона на рисунке вверху слева.

Moroshkin P., Leiderer P., Kono K., Inui S., & Tsubota M. Dynamics of the Vortex-Particle Complexes Bound to the Free Surface of Superfluid Helium. Phys. Rev. Lett. **122**, 174502 (2019).

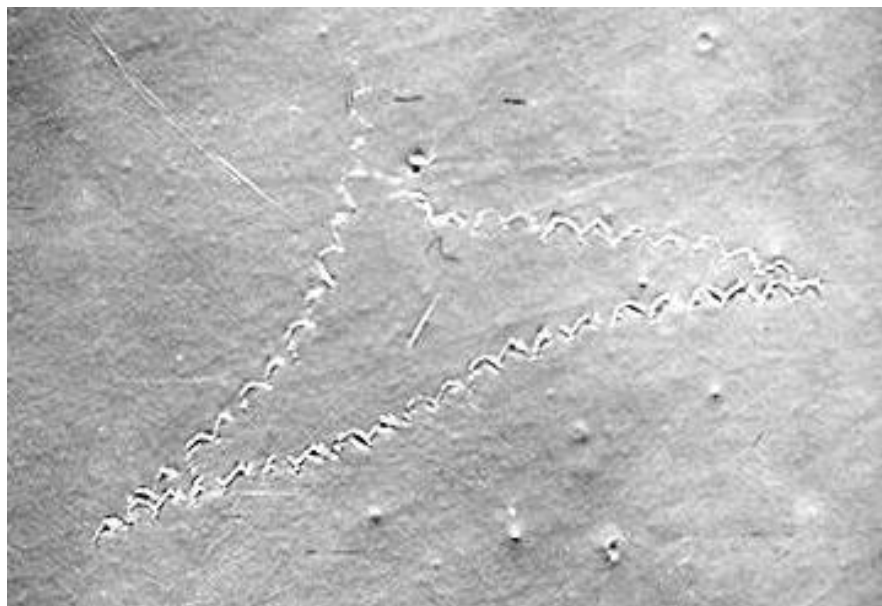
Моделирование движения квантовых вихрей заканчивающихся на свободной поверхности сверхтекучего He



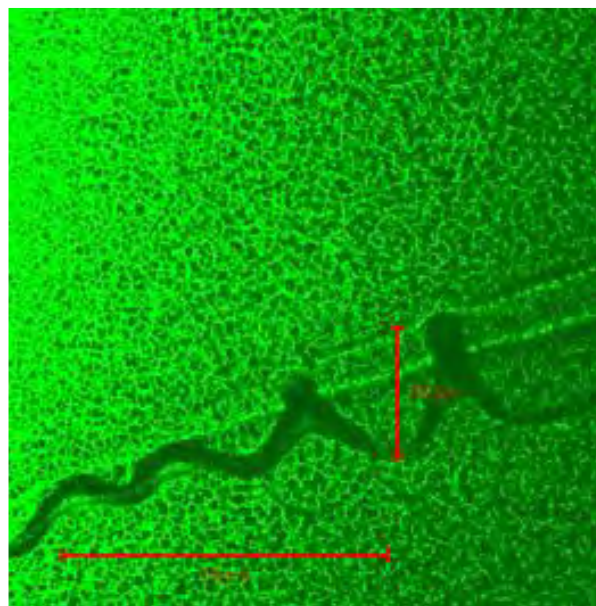
«Мы интерпретируем наши наблюдения в терминах двух типов поверхностных вихрей: линейной вертикальной нити и полукольца. Линейная вихревая нить остается закрепленной внизу, при этом верхний конец и прикрепленная частица движутся по круговой траектории. Вихревое полукольцо движется вместе с захваченной частицей прямолинейно.»* На рисунке (d) показано движение двух полукольцевых вихрей. Траектория каждого полукольца представлена следами двух его кончиков вдоль поверхности. Предполагается, что частица субмикронного диаметра захвачена на одном конце вихря, как показано на рисунке (b).

*Moroshkin P., Leiderer P., Kono K., Inui S., & Tsubota M. Dynamics of the Vortex-Particle Complexes Bound to the Free Surface of Superfluid Helium. Phys. Rev. Lett. **122**, 174502 (2019).

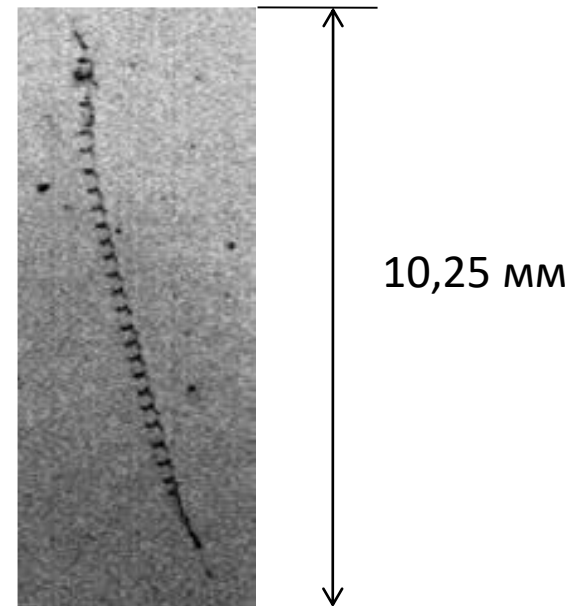
Примеры циклоидоподобных треков θ -излучения



Из работы М.И. Солина



Из работ В.А. Скворцова и Н.И. Фогель



Механизм создания треков θ - излучением

Способность включений твёрдой фазы создавать треки обусловлена тем, что они являются нормальной компонентой квинтэссенции с плотностью порядка плотности жидкой фазы квинтэссенции и, поэтому, взаимодействуют с покоящимся атомарным веществом с силой трения (6):

$$\vec{F}_{\text{тр}} = -\bar{\mu}\rho_n n V \vec{u}_n \quad (6)$$

где $\bar{\mu}$ - коэффициент трения,

ρ_n - плотность нормальной компоненты квинтэссенции,

n – концентрация атомарной материи,

V – объём твёрдой частицы квинтэссенции,

$\vec{u}_n$ - скорость нормальной компоненты квинтэссенции.

Достаточно большая сила трения между частицей твёрдой фазы квинтэссенции, захваченной вихревым полукольцом и атомарной материей обусловлена двумя факторами:

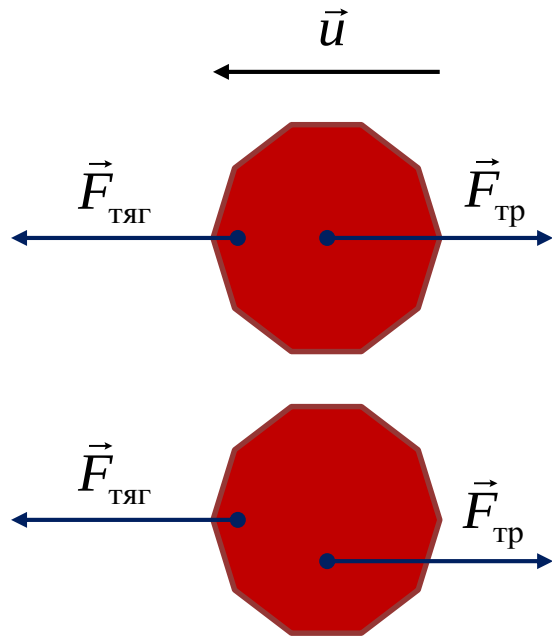
- Тем, что для включений твёрдой фазы квинтэссенции плотность нормальной компоненты чрезвычайно высока – порядка плотности квинтэссенции:

$$\rho_n \approx \rho$$

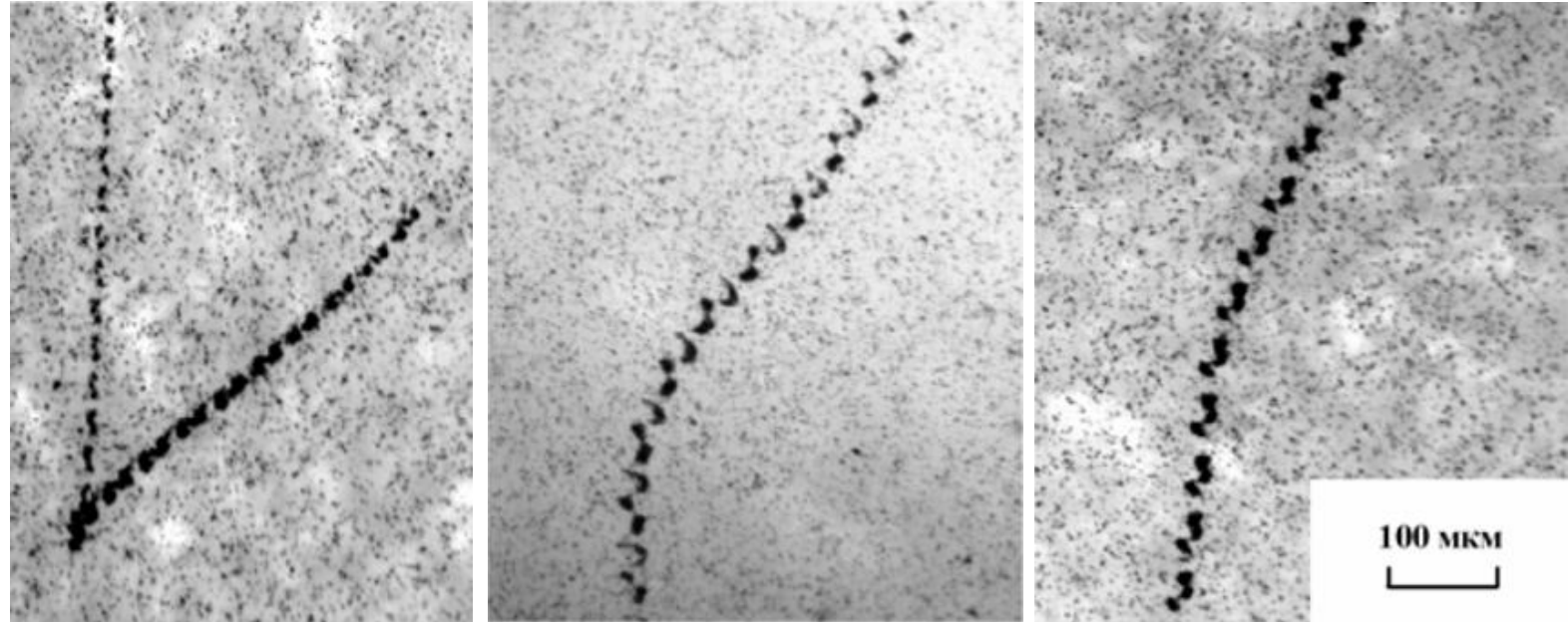
- Достаточно высокой скоростью вихревого полукольца, вместе с которым движется твёрдая частица квинтэссенции, которая по нашим оценкам составляет:

$$u_n \approx u_{r/2} \approx 10^4 \text{ м/с}$$

Причина индивидуальности периодических треков θ -излучения



А)



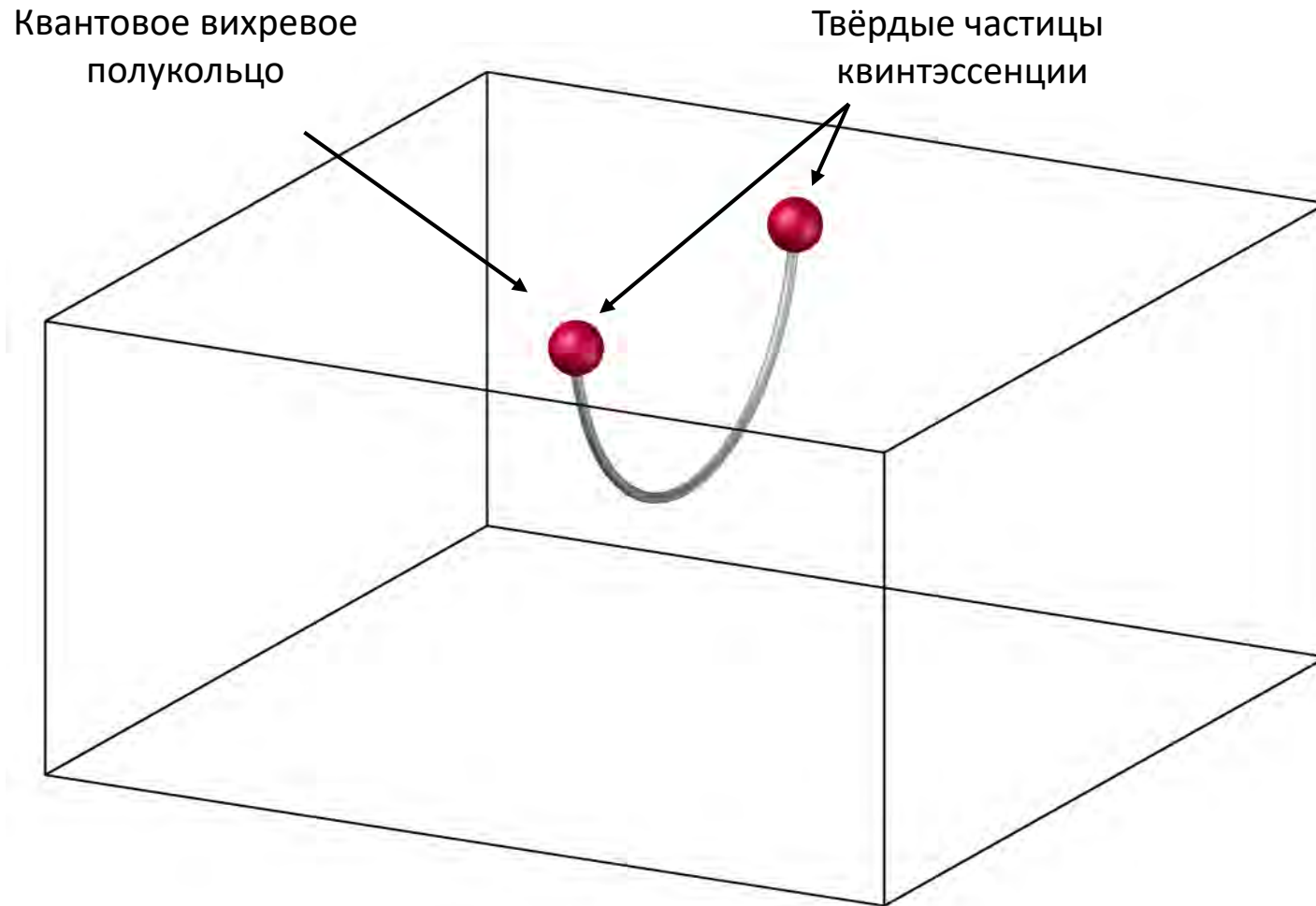
Б)

Согласно рассматриваемой модели, индивидуальность треков θ -излучения обусловлена тем, что они прочерчиваются макроскопическими включениями твёрдой фазы квинтэссенции разной формы и размера.

А) Пара сил, действующая на частицу твёрдой фазы квинтэссенции, разворачивающая её в соответствии с мгновенным направлением скорости движения (верхний рисунок), приводящая к вращению частицы (нижний рисунок), Б) Треки странного излучения с индивидуальным почерком, полученные при электровзрыве проводников.

IV. Парные треки θ -излучения

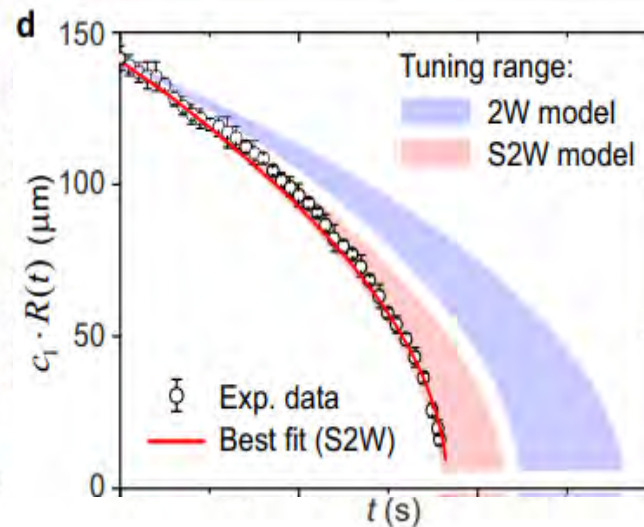
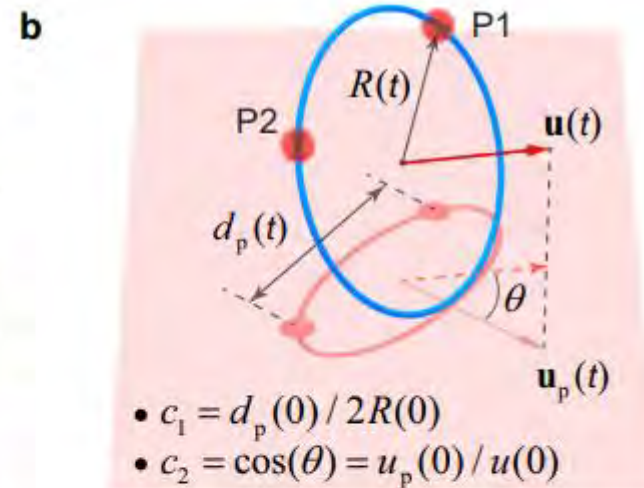
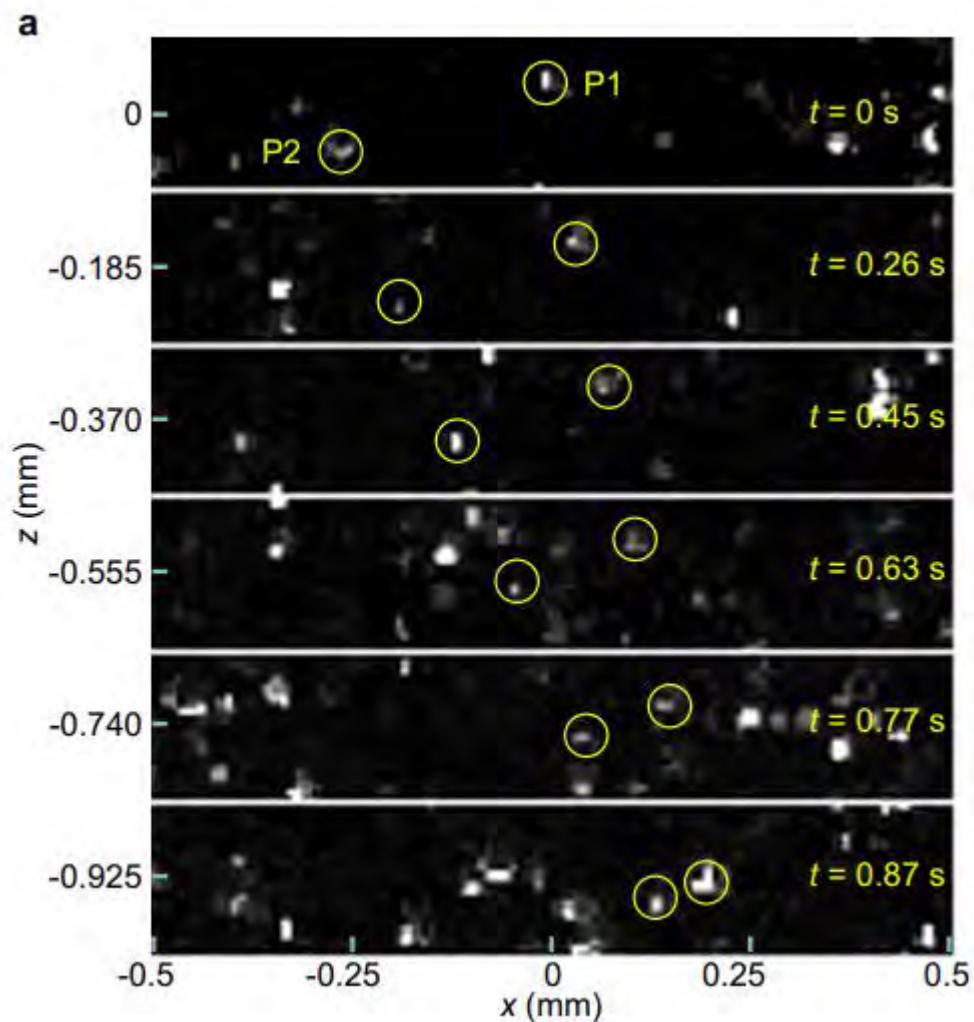
θ -излучение с двумя твёрдыми частицами квинтэссенции



θ - излучение создаёт парный трек на поверхности твёрдотельного детектора, когда два различных включения твёрдой фазы квинтэссенции захватываются двумя воронками одного и того же полукольцевого квантового вихря на поверхности квинтэссенции.

Расстояние между двумя следами трека соответствует при этом диаметру вихревого полукольца. Потеря энергии полукольцевым вихрем приводит к уменьшению его диаметра.

Вихревое кольцо с двумя захваченными частицами в сверхтекучем гелии



Анализ вихревого кольца с двумя захваченными частицами:

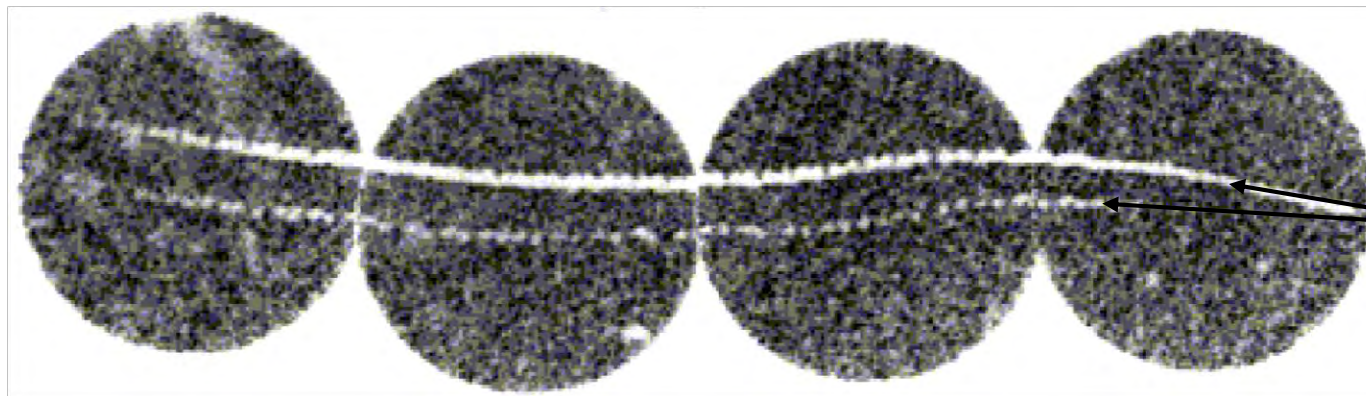
a Изображения, показывающие две захваченные частицы (обведены кружком), движущиеся в He II при 1,65 К.

b Схема, объясняющая концепцию проекционных параметров c_1 и c_2 .

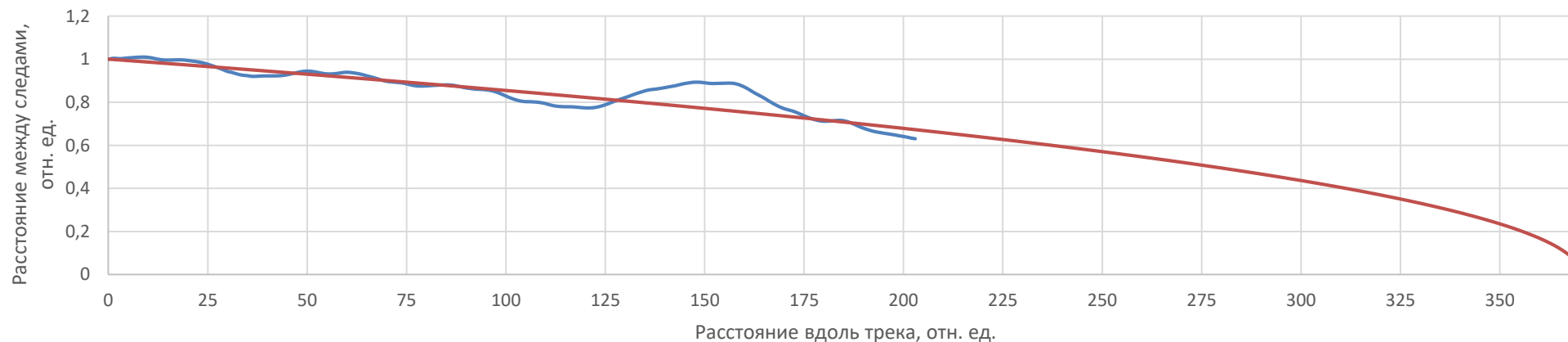
d Сравнение прогнозируемого радиуса и скорости кольца с данными моделирования.

Tang, Y., Guo, W., Kobayashi, H. et al. Imaging quantized vortex rings in superfluid helium to evaluate quantum dissipation. Nat Commun 14, 2941 (2023).

Зависимость расстояния между двумя следами θ - излучения от расстояния вдоль трека



Треки двух твёрдых частиц квинтэссенции, захваченных вихревым полукольцом



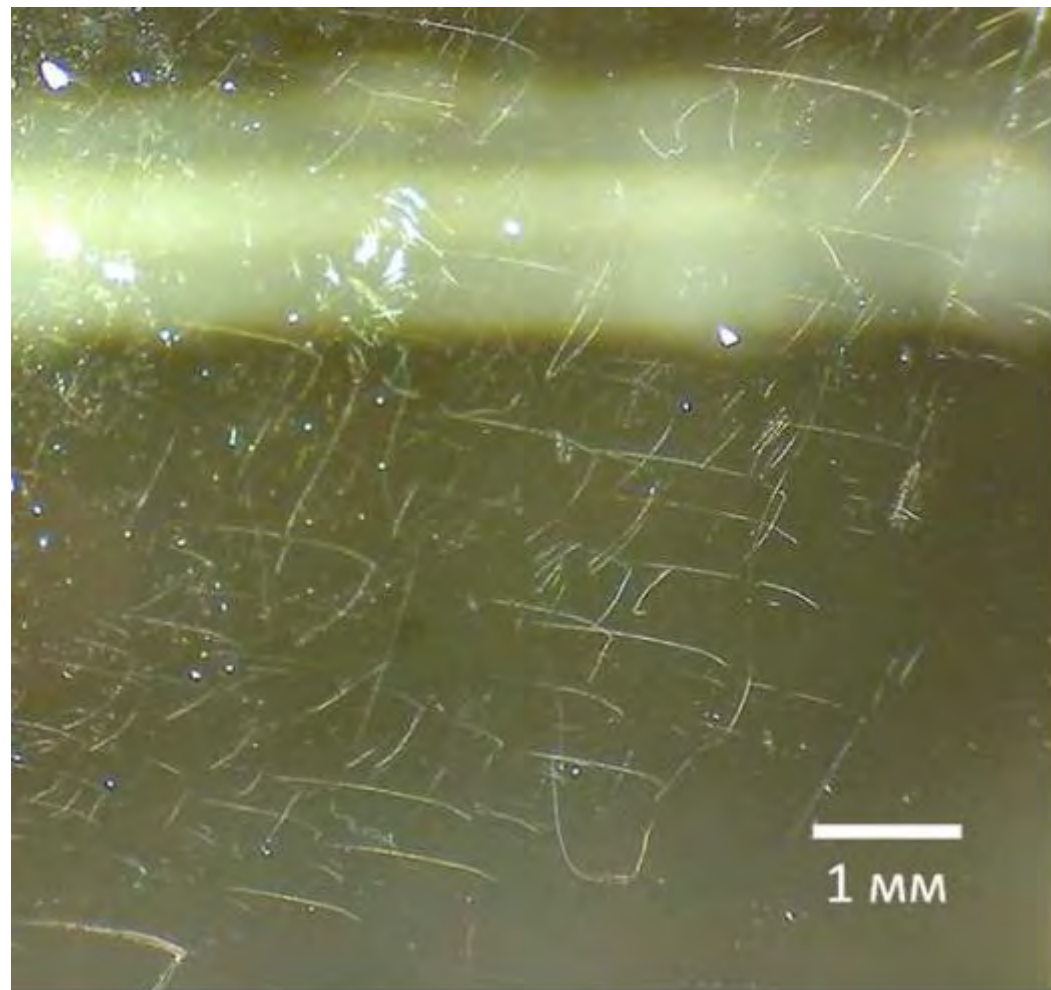
Максимальное расстояние между следами **140 мкм**. Голубой цвет – данные измерений*, коричневый – результат моделирования**.

*Уруцкоев Л. И. и др. // Прикладная физика. 2000. № 4. с. 83-100.

**А. В. Чистилинов Механизм образования треков странного излучения. Доклад на РКХТЯиШМ-27 06.10.2022.

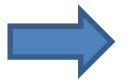
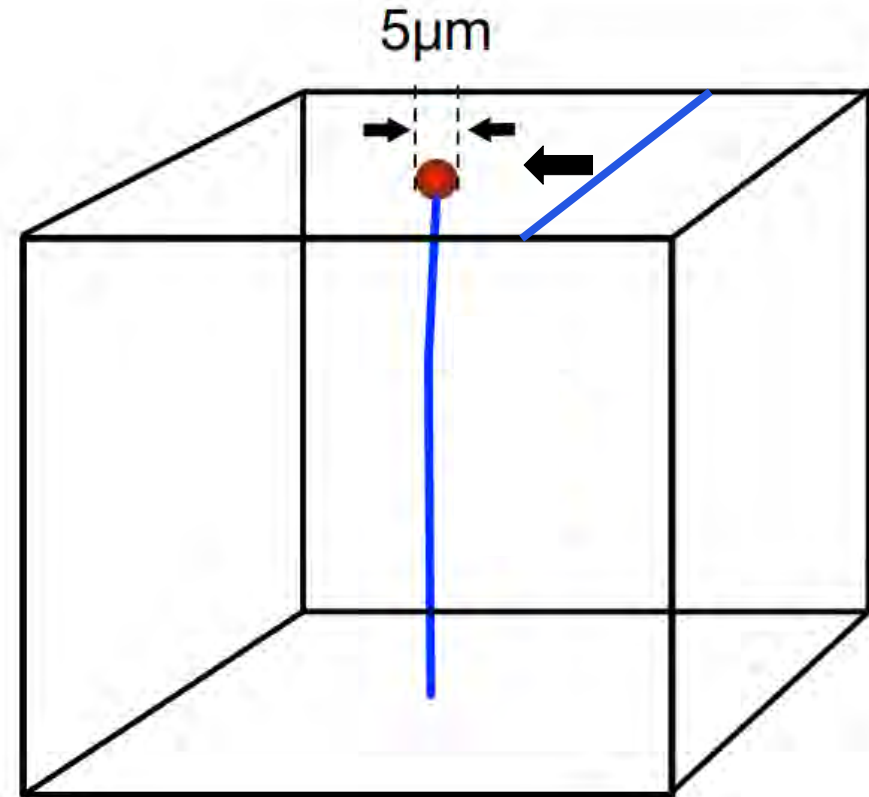
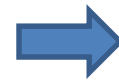
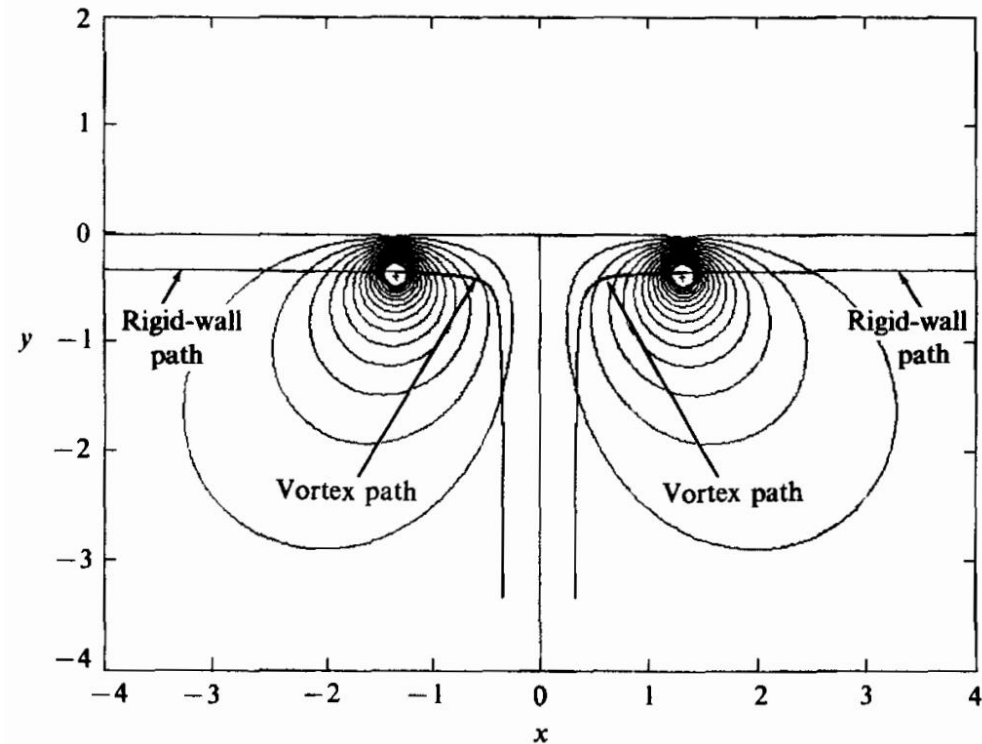
V. Множественные и зеркальные треки θ' -излучения

Множественные треки θ' -излучения



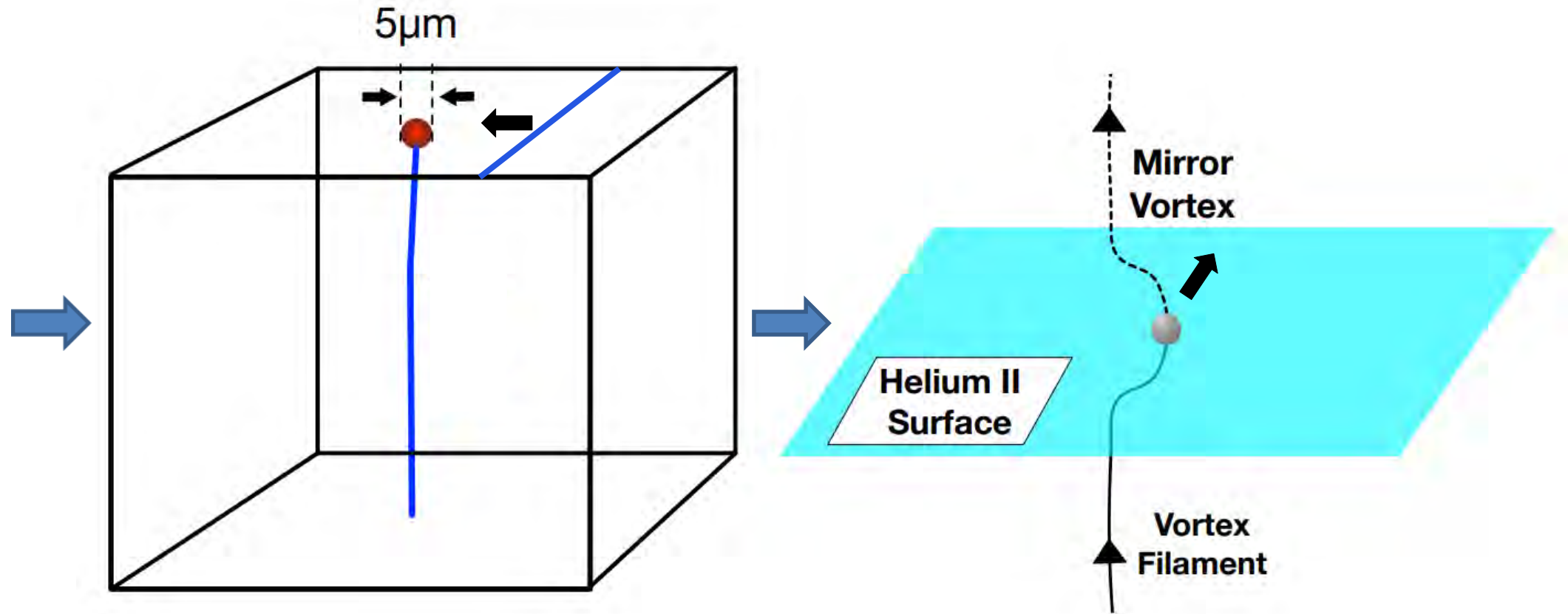
В. А. Жигалов, А. Г. Пархомов

Механизм образования множественных и зеркальных треков θ' -излучения



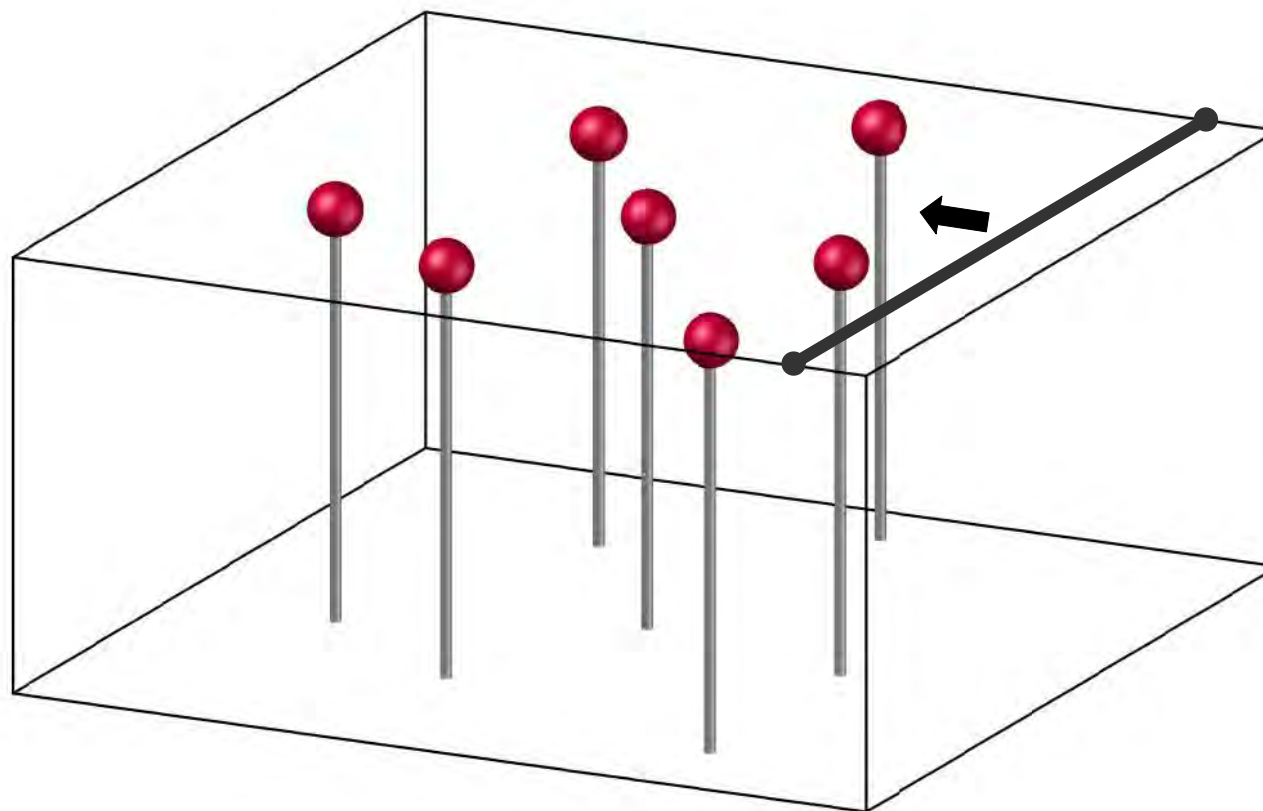
*Telste J.G. Potential flow about two counter-rotating vortices approaching a free surface // J. Fluid Mech. 1989. V. 201. P. 259-278.

Механизм образования множественных и зеркальных треков θ' -излучения



Inui S., Tsubota M., Moroshkin P. et al. Dynamics of Fine Particles Due to Quantized Vortices on the Surface of Superfluid He 4 // *J Low Temp Phys* **196**, 190–196 (2019).

Механизм образования множественных и зеркальных треков θ' -излучения



VI. Система уравнений для ζ, η, θ и θ' - излучения

Система уравнений для моделирования ζ, η, θ и θ' - излучения

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}_s}{\partial t} + (\vec{u}_s \cdot \nabla) \vec{u}_s \right) = -\nabla P \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \vec{u}_s = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \times \vec{u}_s = 0 \quad (9)$$

$$m \oint \vec{u}_s \cdot d\vec{l} = 2\pi\hbar j \quad (10)$$

$$M_i \frac{d\vec{u}_i}{dt} = - \oint P d\vec{S}_i - \underline{\mu M_i \vec{u}_i} \quad (11)$$

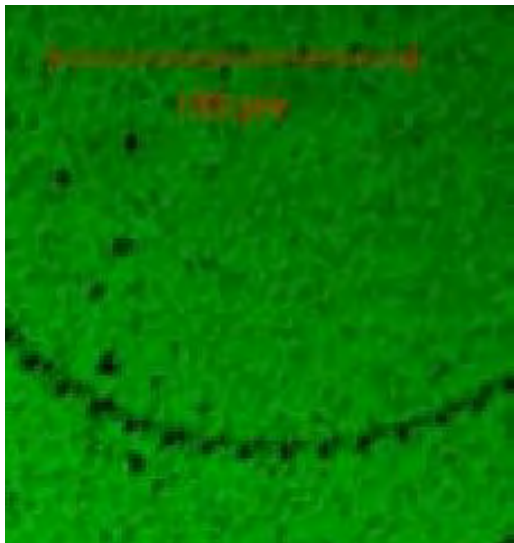
$$\hat{I}_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = - \oint P (\vec{r}_i \times d\vec{S}_i) - \underline{\mu \hat{I}_i \vec{\omega}_i} \quad (12)$$

где $\vec{u}_s$ - скорость сверхтекучей компоненты квинтэссенции, $\vec{u}_i$ – поступательная скорость твёрдой частицы квинтэссенции (К.),
 ρ - плотность квинтэссенции, M_i – масса твёрдой частицы квинтэссенции,
 P - давление квинтэссенции, $\vec{\omega}_i$ – угловая скорость вращения твёрдой частицы квинтэссенции,
 m – масса элементарной частицы квинтэссенции, μ – объёмный коэффициент трения между твёрдой частицей К. и атомарной материей,
 $\hbar$ - постоянная Планка, $\hat{I}_i$ – тензор инерции твёрдой частицы квинтэссенции,
 j - произвольное целое число, $d\vec{S}_i$ – элемент площади поверхности твёрдой частицы квинтэссенции,
 $d\vec{l}$ - элемент длины, $\vec{r}_i$ – радиус – вектор точки поверхности твёрдой частицы К. относительно её ц. м.,
 i – номер твёрдой частицы квинтэссенции.

На этом основная часть доклада
закончена, но есть ещё два
дополнения ...

VII. Развороты треков θ -излучения

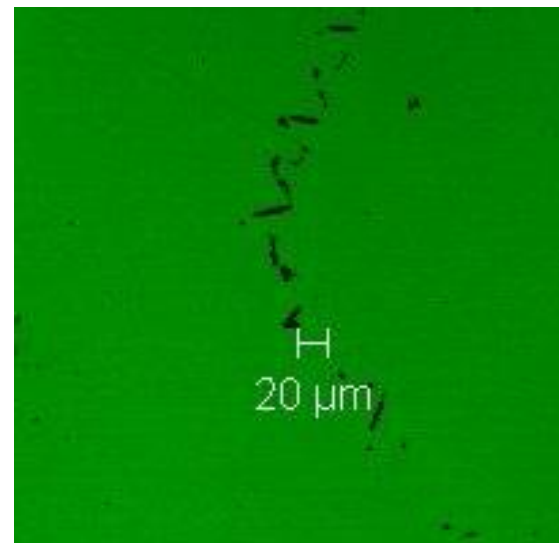
Развороты треков θ -излучения



В.А. Скворцов

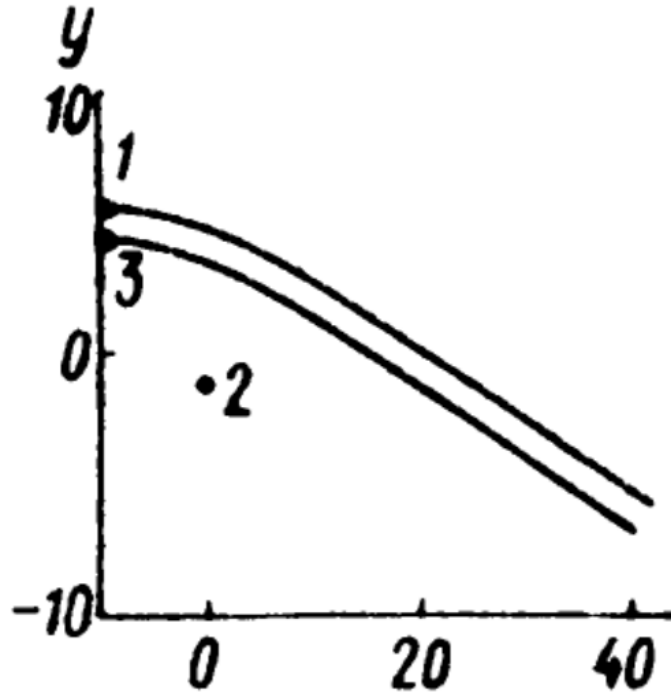


Л.И. Уруцкий



В.А. Скворцов

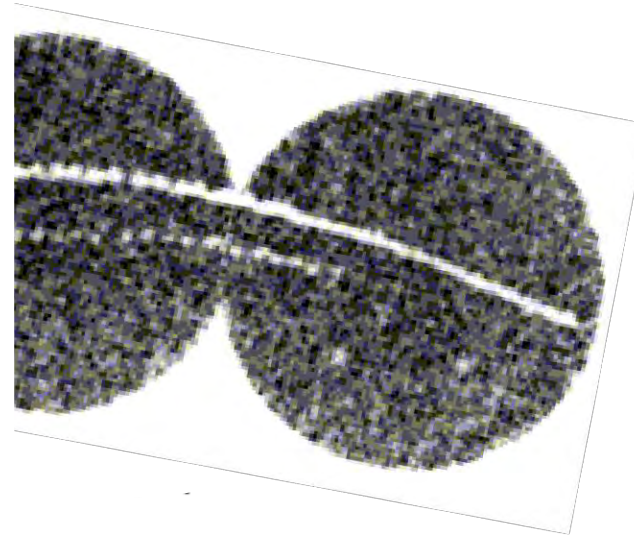
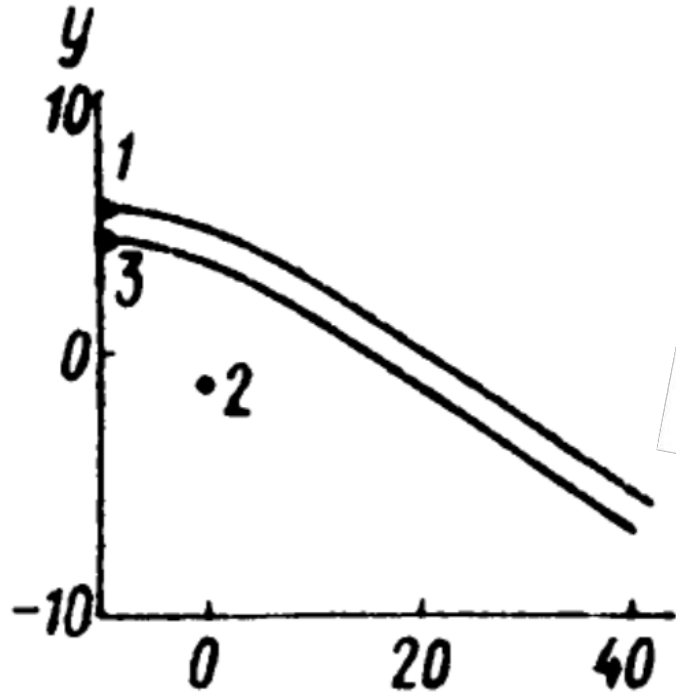
Движение вихревой пары точечных вихрей в поле третьего вихря



Движение вихревой пары 1, 3 в поле точечного вихря 2. Пронумерованными точками обозначены начальные положения точечных вихрей.

Мелешко В.В., Константинов М.Ю. Динамика вихревых структур. Киев: Наук. думка, 1993. 279 с.

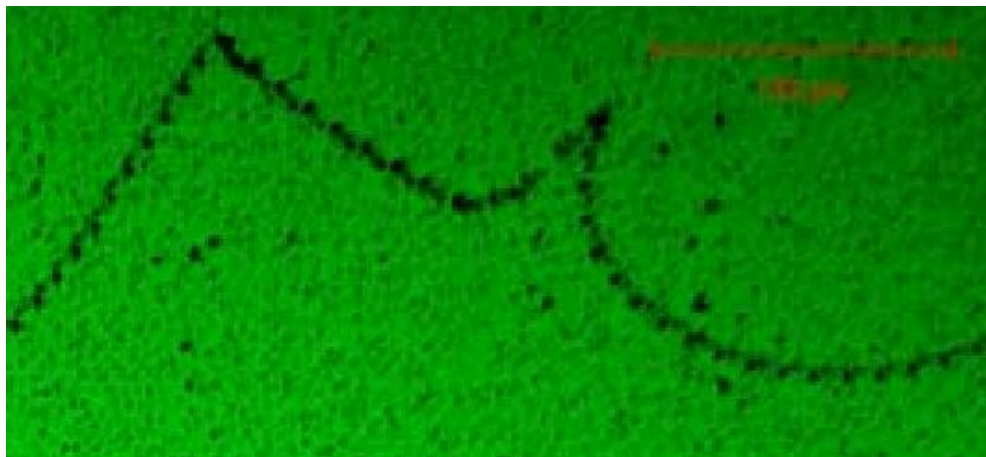
Сопоставление траектории вихревой пары точечных вихрей в поле третьего вихря с треком θ - излучения



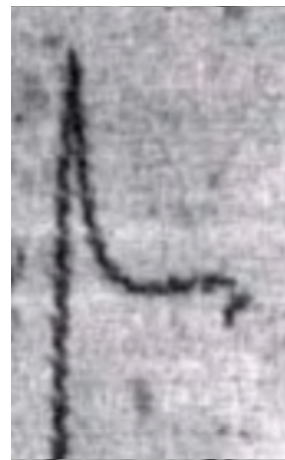
Мелешко В.В., Константинов М.Ю. Динамика вихревых структур. Киев: Наук. думка, 1993. 279 с.
Уруцкоев Л. И. и др. // Прикладная физика. 2000. № 4. с. 83-100.

VIII. Развороты и изломы треков θ -излучения

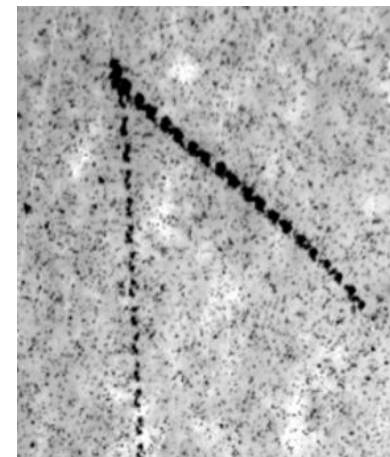
Примеры изломов треков θ -излучения



В.А. Скворцов

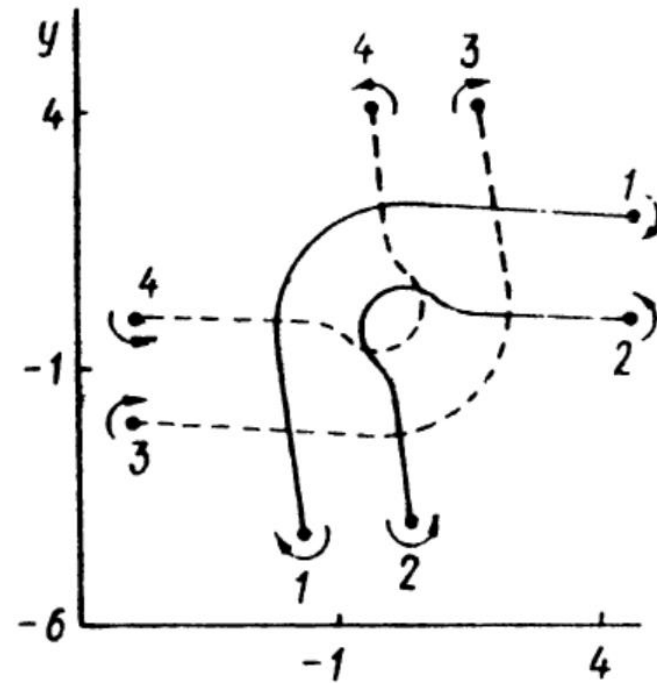


С.В. Адаменко



Л.И. Уруцкий

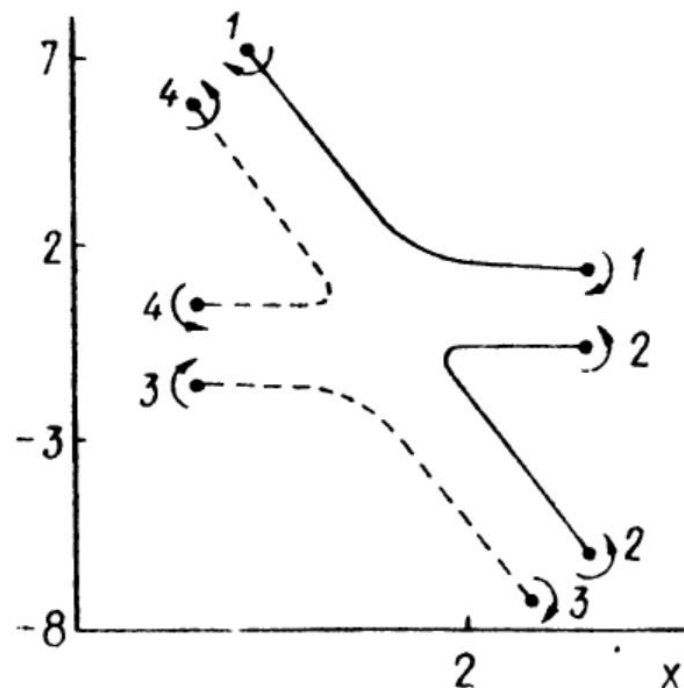
Разворот двух пар точечных вихрей движущихся навстречу друг другу



Столкновение двух вихревых пар 4, 3 и 1, 2, движущихся навстречу друг другу, приводящее к изменению направления их движения. Вихревая пара 4, 3 в начальный момент времени движется слева направо, вихревая пара 1, 2 справа налево.

Мелешко В.В., Константинов М.Ю. Динамика вихревых структур. Киев: Наук. думка, 1993. 279 с.

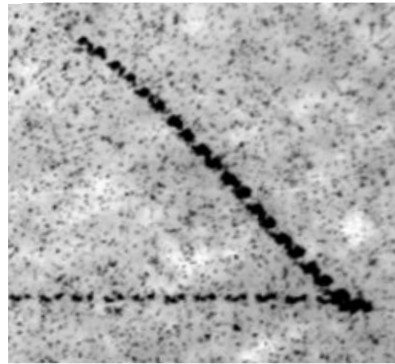
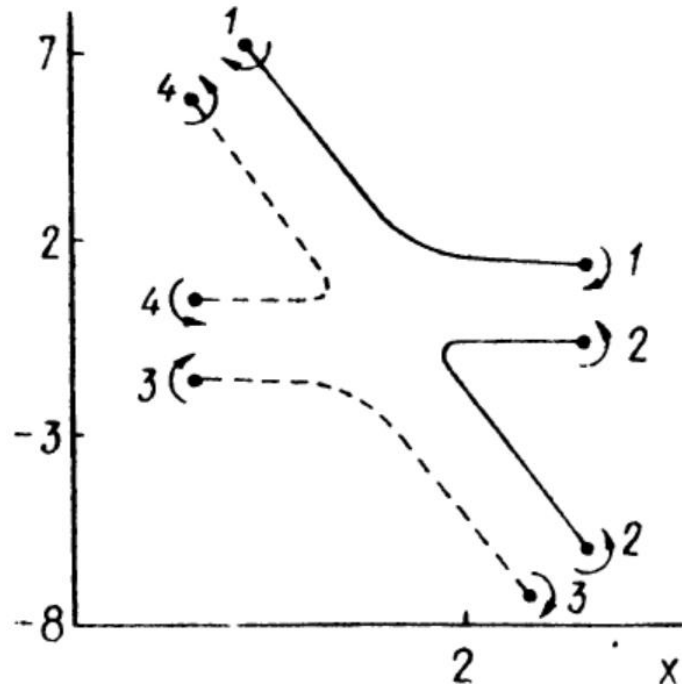
Обмен вихрями двух пар точечных вихрей движущихся навстречу друг



Столкновение двух вихревых пар 4, 3 и 1, 2, движущихся навстречу друг другу, приводящее к обмену вихрями между вихревыми парами. Вихревая пара 4, 3 в начальный момент времени движется слева направо, вихревая пара 1, 2 справа налево.

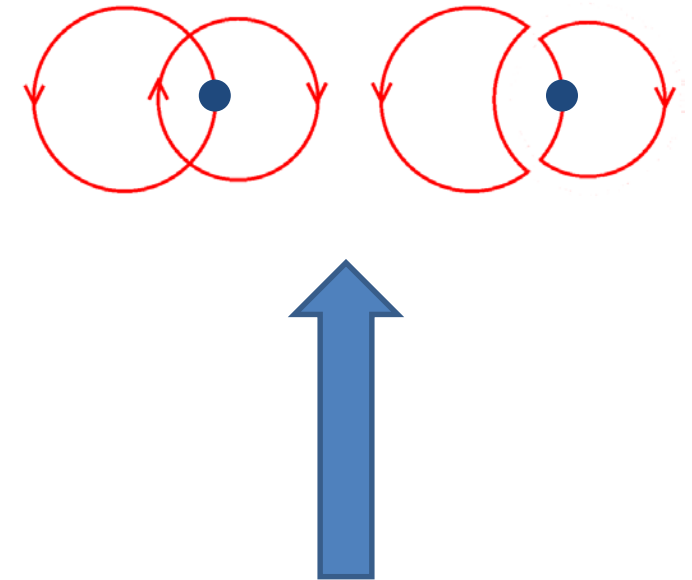
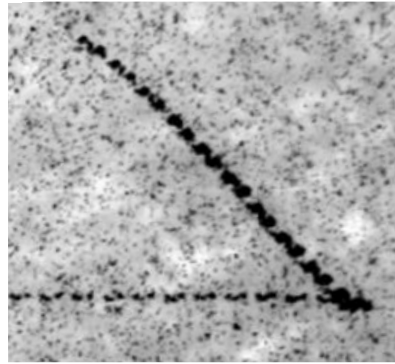
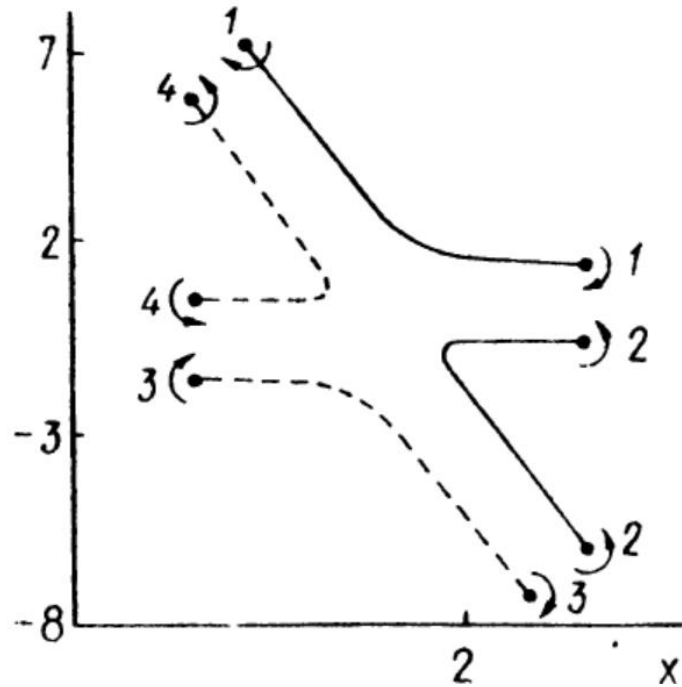
Мелешко В.В., Константинов М.Ю. Динамика вихревых структур. Киев: Наук. думка, 1993. 279 с.

Сопоставление треков двух пар точечных вихрей движущихся навстречу друг другу с треком θ - излучения



Мелешко В.В., Константинов М.Ю. Динамика вихревых структур. Киев: Наук. думка, 1993. 279 с.
Агапов А. С. и др. //Прикладная физика. 2007. №1. с. 36 – 44.

Сопоставление треков двух пар точечных вихрей движущихся навстречу друг другу с треком θ - излучения



Baggaley A. W., Barenghi C. F., Sergeev Y. A. Three-dimensional inverse energy transfer induced by vortex reconnections Phys. Rev. E 89, 013002, 2014.

IX. Заключение

Выводы

1. Построена **модель** странного излучения, основанная на макроскопических квантовых эффектах в сверхтекучей жидкости.
2. Предлагаемая модель **качественно объясняет все основные свойства треков** странного излучения.
3. **Моделирование** любых реальных треков **может быть осуществлено путём численного решения системы дифференциальных уравнений**, представленной в данном докладе.
4. **Показано, что в рамках предложенной модели удаётся объяснить:**
 - a) Почему странное излучение, обладая большой проникающей способностью, оставляет **треки на поверхности твердотельных детекторов**.
 - b) Почему треки идут **строго вдоль поверхности твердотельных детекторов** независимо от направления на источник излучения.
 - c) Почему треки являются **строго периодическими**.
 - d) Почему колебания происходят **в плоскости поверхности** детектора.
 - e) Почему колебания имеют **макроскопическое сечение**.
 - f) Почему треки имеют **индивидуальный рисунок**.
 - g) Почему возникают **сдвоенные треки**.
 - h) Почему возникают **множественные треки**.
 - i) Почему возникают **зеркальные треки**.
 - j) Почему возникают **развороты и изломы треков**.

Спасибо за внимание