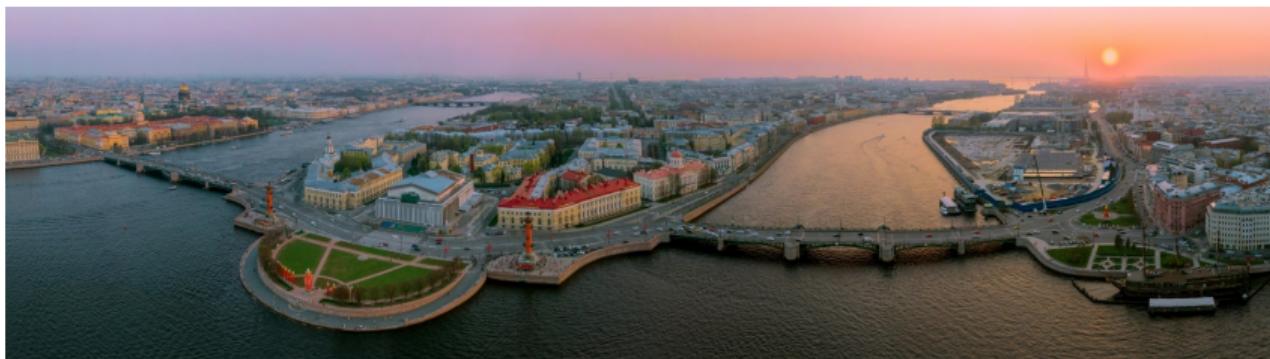


Динамика массы и энергии

А. М. Кривцов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра великого
Институт проблем машиноведения РАН



Проблема рационального описания общих физических явлений

Механика — универсальный инструмент для описания практически любых явлений в физическом мире. Методы, заимствованные из современной механики, должны быть использованы для построения рациональной основы общих физических теорий. Механические модели помогают нам достичь интуитивного понимания физических явлений и будут играть важную роль в разработке новых теорий мироздания¹.

Павел Андреевич Жилин



¹Записано А.М. Кривцовым со слов П.А. Жилина.

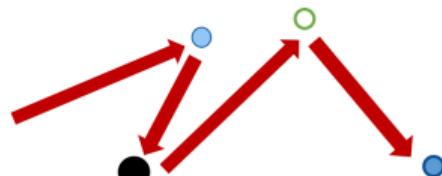
Некоторые общие физические явления

- Диффузионный перенос массы и энергии (классическая диффузия и теплопередача)
- Динамический перенос массы и волновой перенос энергии (динамика вещества и баллистический теплоперенос)
- Корпускулярно-волновой дуализм в физике твердого тела (фононы и прочие квазичастицы)
- Корпускулярно-волновой дуализм в квантовой механике (элементарные частицы и др.)
- Кинетическое описание волновых процессов: диффузионных, аномальных и баллистических (передача энергии и тепла)
- Перенос импульса электромагнитным полем (совместный баланс импульса поля и материи)

Диффузионный и баллистический перенос тепла

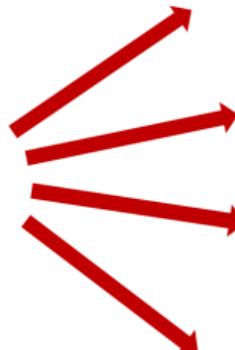
Диффузионный перенос тепла:

- Типичен для макроскопических систем
- Результат отражения от дефектов и неоднородностей
- Диффузионное распространение упругих волн



Баллистический перенос тепла:

- Реализуется в микросистемах
- Наблюдается в сверхчистых материалах
- Баллистическое распространение упругих волн



Кинетическая теория теплопереноса в твердых телах

Волны представлены квазичастицами (фононами), удовлетворяющими кинетической теории газов

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{coll}} \quad \text{— Кинетическое уравнение Больцмана}^2$$

Результаты:

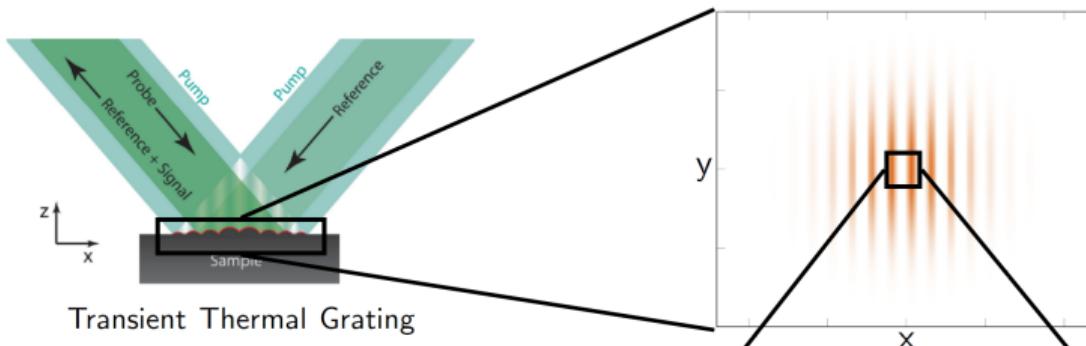
- Описание теплопереноса в кристаллических иэлектриках и других твердых телах
- Второй звук в твердом теле

Открытый вопрос:

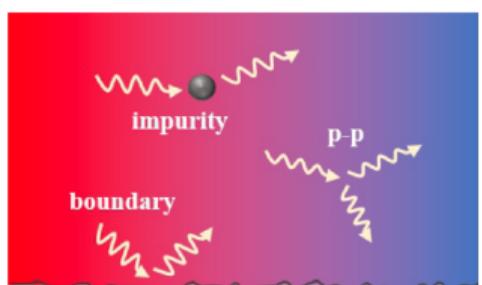
- Явная связь с динамикой решетки

² f — функция распределения, t — время, \mathbf{v} — скорость, $\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{coll}}$ — интеграл столкновений

Кинетическое описание теплопереноса в твердых телах



Transient Thermal Grating
(TTG) experiment, Huberman [8]



Phonon scattering mechanisms, Chen [7]



TTG simulation, Falco and Borisenkov

Литературные источники

1. E. Schrodinger, Zur Dynamik elastisch gekoppelter Punktsysteme, Annalen der Physik 44 (1914) 916–934. (На немецком)
2. G. Klein, I. Prigogine, Sur la mecanique statistique des phenomenes irreversibles I, Physica 19 (1) (1953) 74–88. (На французском)
3. С.В. Измайлов. Курс электродинамики. М.: Изд-во минпросвещ. РСФСР. 1962.
4. И.А. Кунин. Теория упругих сред с микроструктурой. М.: Наука. 1975.
5. Lepri S. (eds) Thermal Transport in Low Dimensions. Springer, Cham. 2016.
6. П.А. Жилин. Основы рациональной механики. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018.
7. H. Bao, J. Chen, X. Gu, and B. Cao. A review of simulation methods in micro/nanoscale heat conduction. ES Energy & Environment, 1(39):16–55, 2018.
8. S. Huberman et al. Observation of second sound in graphite at temperatures above 100 k. Science, 364(6438):375–379, 2019.
9. A.M. Krivtsov. Dynamics of matter and energy. ZAMM. 2022.

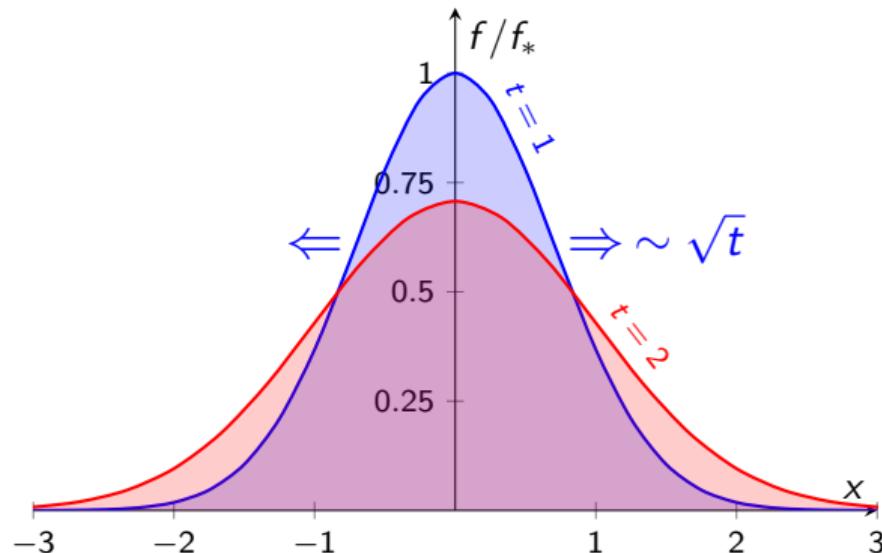
Диффузионный перенос массы и энергии

- Уравнение диффузии

$$\dot{\rho} = \beta_\rho \rho''.$$

- Уравнение теплопроводности

$$\dot{T} = \beta_T T''.$$



Пространственное распределение переносимой величины
в различные моменты времени;
 $f = f(x, t) \in \{\rho, T\}$; $f_* = f(0, 1)$.

Здесь ρ и T — плотность и температура, β_ρ и β_T — коэффициенты диффузии и температуропроводности, точка и штрих — производные по времени t и координате x .

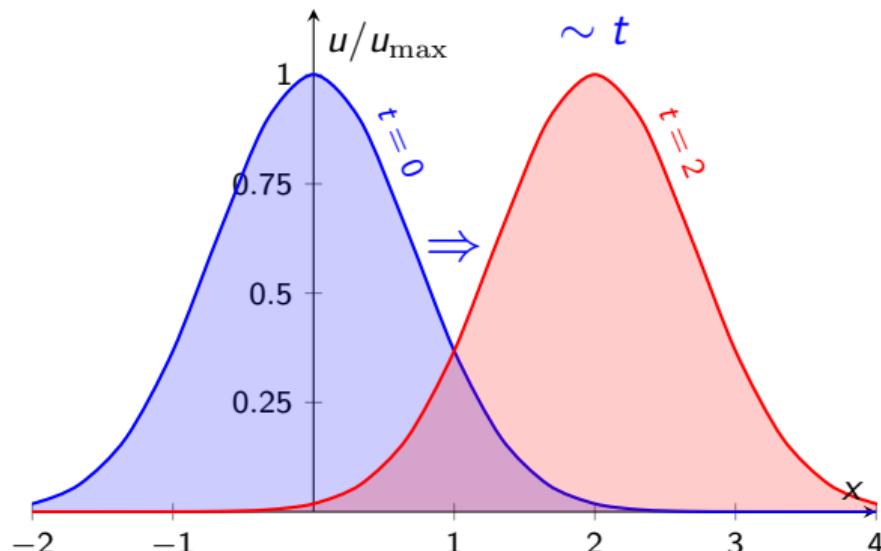
Волновой перенос

- Волновое уравнение (первого порядка)

$$\dot{u} = cu'.$$

- Общее решение

$$u(x, t) = \varphi(x - ct).$$



Здесь $u = u(x, t)$ — функция координаты и времени (возмущение среды), c — волновая скорость.

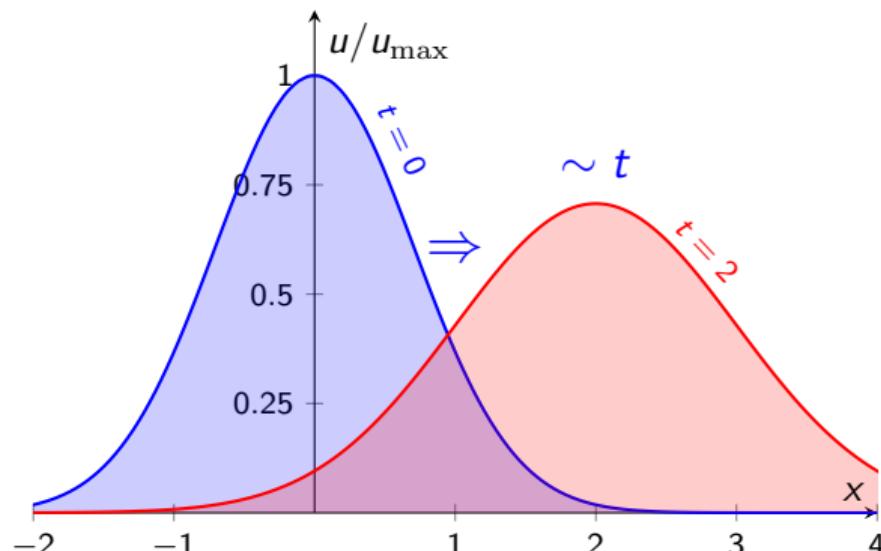
Волновой перенос с дисперсией

- Семейство волновых уравнений

$$\dot{\varphi} = c(v)\varphi'.$$

- Общее решение

$$u(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x - c(v)t) dv.$$



Здесь $u = u(x, t)$ — функция координаты и времени (возмущение среды), c — волновая скорость.

Перенос массы и перенос энергии (1D)

- Система взаимодействующих частиц

$$m_n \ddot{x}_n = F_n.$$

- Суммарная масса

$$m = \sum_{n=1}^N m_n = \text{const.}$$

- Статический момент

$$\mu = \sum_{n=1}^N m_n x_n.$$

- Неоднородная цепочка ($n \in \mathbb{Z}$)

$$m_n \ddot{u}_n = F_{n-\frac{1}{2}} - F_{n+\frac{1}{2}}.$$

- Суммарная энергия

$$E = \sum_n E_n = \text{const.}$$

- 1й момент энергии

$$M = \sum_n E_n \xi_n,$$

где ξ_n — отсчетное положение частицы.

Неоднородная цепочка: детали

- Уравнение динамики (u_n — перемещение частицы, $n \in \mathbb{Z}$):

$$m_n \ddot{u}_n = F_{n-\frac{1}{2}}(u_n - u_{n-1}) - F_{n+\frac{1}{2}}(u_{n+1} - u_n).$$

- Локальная энергия (сумма кинетической энергии частицы плюс полусумма потенциальных энергий связей):

$$E_n = \frac{1}{2} \Pi_{n+\frac{1}{2}} + K_n + \frac{1}{2} \Pi_{n-\frac{1}{2}}, \quad K_n = \frac{1}{2} m_n \dot{u}_n^2, \quad \Pi_{n+\frac{1}{2}} = \Pi_{n+\frac{1}{2}}(u_{n+1} - u_n).$$

- Связь силы и потенциальной энергии связи

$$F_{n+\frac{1}{2}} = -\frac{d\Pi_{n+\frac{1}{2}}}{d(u_{n+1} - u_n)}.$$

Перенос массы и перенос энергии (1D)

- Система взаимодействующих частиц

$$m_n \ddot{x}_n = F_n.$$

- Суммарная масса

$$m = \sum_{n=1}^N m_n = \text{const.}$$

- Статический момент

$$\mu = \sum_{n=1}^N m_n x_n.$$

- Неоднородная цепочка ($n \in \mathbb{Z}$)

$$m_n \ddot{u}_n = F_{n-\frac{1}{2}} - F_{n+\frac{1}{2}}.$$

- Суммарная энергия

$$E = \sum_n E_n = \text{const.}$$

- 1й момент энергии

$$M = \sum_n E_n \xi_n,$$

где ξ_n — отсчетное положение частицы.

Центр масс и центр энергии

- Центр масс

$$x_c = \frac{\mu}{m} = \frac{\sum_n m_n x_n}{\sum_n m_n}.$$

- Центр энергии

$$x_c = \frac{M}{E} = \frac{\sum_n E_n \xi_n}{\sum_n E_n}.$$

- Импульс

$$p = \dot{\mu} = \sum_n m_n \dot{u}_n.$$

- Суммарный поток энергии

$$h = \dot{M} = \sum_n \dot{E}_n \xi_n.$$

- Скорость центра масс

$$v_c = \frac{p}{m} \Leftrightarrow p = mv_c.$$

- Скорость центра энергии

$$v_c = \frac{h}{E} \Leftrightarrow h = Ev_c.$$

Неоднородная цепочка: явные формулы

- Полная энергия

$$E = \sum_n \left(\frac{1}{2} m_n v_n^2 + \Pi_{n+\frac{1}{2}} \right).$$

- Полный поток энергии

$$h = \frac{1}{2} \sum_n (v_{n+1} + v_n) F_{n+\frac{1}{2}} a_{n+\frac{1}{2}}.$$

Здесь использованы обозначения для скорости частицы и длины связи:

$$v_n = \dot{u}_n, \quad a_{n+\frac{1}{2}} = \xi_{n+1} - \xi_n;$$

силы и потенциальной энергии:

$$F_{n+\frac{1}{2}} = F_{n+\frac{1}{2}}(u_{n+1} - u_n), \quad \Pi_{n+\frac{1}{2}} = \Pi_{n+\frac{1}{2}}(u_{n+1} - u_n).$$

Уравнение динамики

- Баланс импульса

$$\dot{p} = F.$$

- Баланс полного потока энергии

$$\dot{h} = \Phi.$$

- Теорема о движении центра масс

$$m\dot{v}_c = F.$$

- Динамика центра энергии

$$E\dot{v}_c = \Phi.$$

- Суммарная внешняя сила

$$F = \sum_n F_n.$$

- Энергетическое воздействие

$$\Phi = ?$$

Согласно 3-му закону Ньютона внутренние силы не вносят вклад в суммарную силу.
Энергетическое воздействие вычисляется на основе уравнений динамики цепочки.

Неоднородная цепочка: явные формулы

Глобальное энергетическое действие

$$\Phi = \sum_n \left(\Phi_n^{(a)} + \Phi_n^{(C)} + \Phi_{n+\frac{1}{2}}^{(m)} \right).$$

Локальные действия, вызванные неоднородностью жесткости, длины, массы:

$$\Phi_n^{(a)} = \left(\frac{v_n^2}{4} \left(C_{n+\frac{1}{2}} + C_{n-\frac{1}{2}} \right) + \frac{F_{n+\frac{1}{2}} F_{n-\frac{1}{2}}}{2m_n} \right) \left(a_{n+\frac{1}{2}} - a_{n-\frac{1}{2}} \right),$$

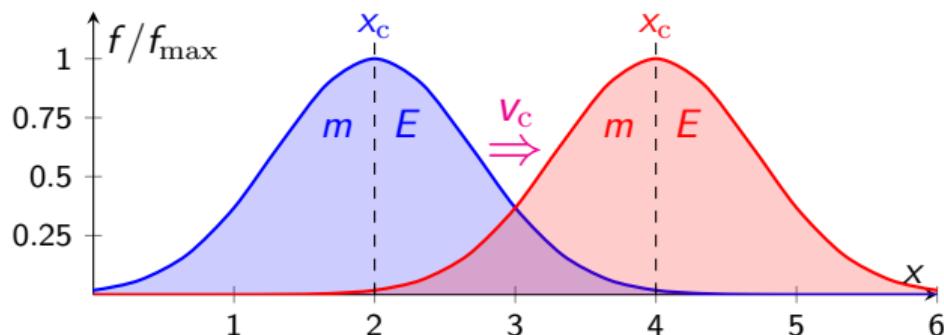
$$\Phi_n^{(C)} = \frac{\left(a_{n+\frac{1}{2}} + a_{n-\frac{1}{2}} \right) v_n^2}{4} \left(C_{n+\frac{1}{2}} - C_{n-\frac{1}{2}} \right), \quad \Phi_{n+\frac{1}{2}}^{(m)} = \frac{a_{n+\frac{1}{2}} F_{n+\frac{1}{2}}^2}{2} \left(\frac{1}{m_{n+1}} - \frac{1}{m_n} \right).$$

Потенциальная энергия, сила и обобщенная жесткость связи:

$$\Pi_{n+\frac{1}{2}} = \Pi_{n+\frac{1}{2}}(u_{n+1} - u_n), \quad F_{n+\frac{1}{2}} = \Pi'_{n+\frac{1}{2}}(u_{n+1} - u_n), \quad C_{n+\frac{1}{2}} = \Pi''_{n+\frac{1}{2}}(u_{n+1} - u_n).$$

Аналогия в переносе массы и энергии

масса	m	E	энергия
статический момент	μ	M	момент энергии
импульс	p	h	поток энергии
внешняя сила	f	Φ	энергетическое воздействие
центр масс	x_c		энергетический центр
скорость переноса массы	v_c		скорость переноса энергии



Эффективные характеристики для распределения энергии

Эффективные масса, статический момент, импульс, сила:

$$m = E/c^2, \quad \mu = M/c^2, \quad p = h/c^2, \quad f = \Phi/c^2,$$

где c — характерная скорость распространения волн в среде.

В частности, выполняется соотношение

$$E = mc^2.$$

Энергетическая динамика

Носитель — субстанция, в которой может осуществляться перенос энергии.

Энергетическое тело — распределение энергии в носителе, удовлетворяющее законам баланса, аналогичным законам, известным для материальных тел.

Фантом — эффективное (воображенное) материальное тело, в котором распределение массы пропорционально распределению энергии в соответствующем энергетическом теле.

Энергетическая динамика — физическая теория, описывающая движение энергетических тел и соответствующих фантомов под действием эффективных сил.

Пример: движение фантома в одномерной цепочке

Массы частиц и длины связей
одинаковы:

$$m_n = m_e, \quad a_n = a.$$

Динамика фантома:

$$m\ddot{x}_c = f.$$

Выражение для силы

$$f = \frac{a}{2c^2} \sum_n \left(C_{n+\frac{1}{2}} - C_{n-\frac{1}{2}} \right) v_n^2.$$

- Постоянные жесткости: $C_n = C$. Сила отсутствует, движение равномерное:

$$x_c = x_0 + v_c t.$$

- Линейно растущие жесткости: $C_n = Dn$. Постоянная сила, движение равноускоренное:

$$x_c = x_0 + v_0 t + \frac{Da}{4m_e} t^2.$$

- Обратные жесткости: $C_n = A/n$. Сила Ньютона, движение в гравитационном поле:

$$\ddot{x}_c = -\frac{Aa}{2m_e} \frac{1}{x_c^2}.$$

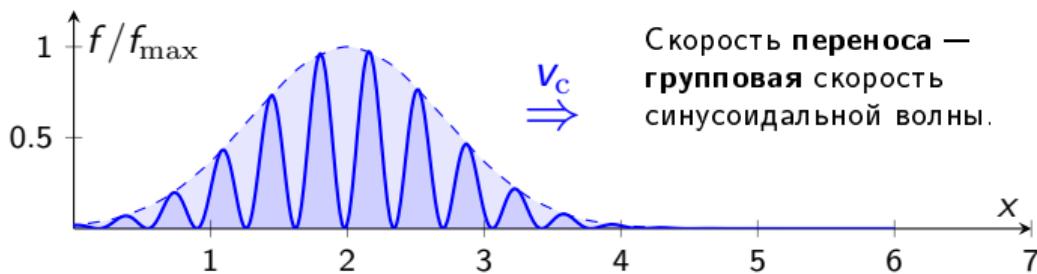
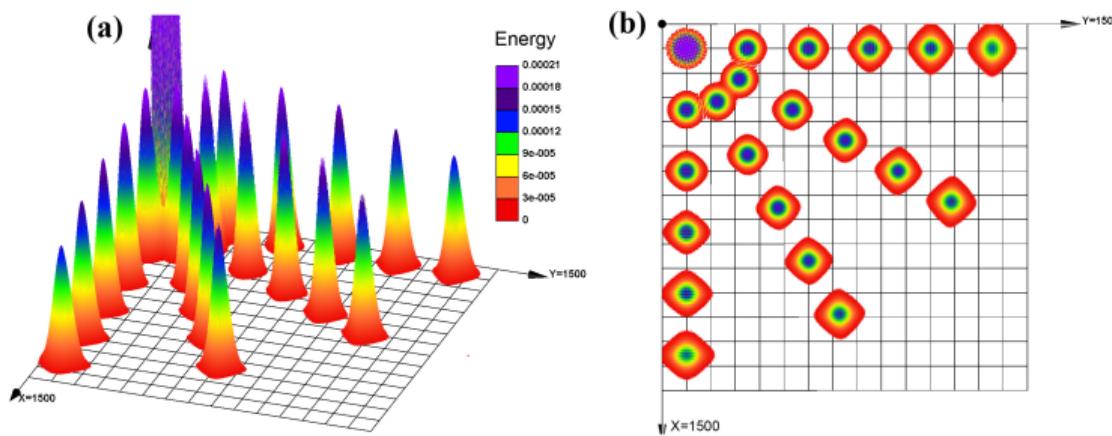
Фантомы в двумерной решетке

Поперечные колебания квадратной однородной гармонической решетки.

Сила равна нулю,
движение равномерное.

Расчеты Н.М. Бессонова.

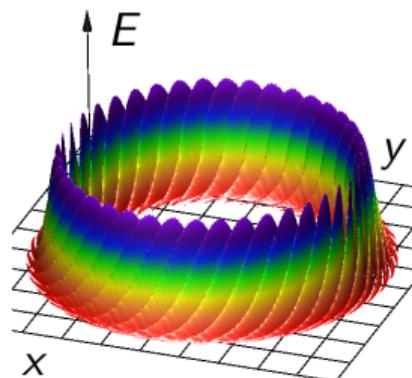
Структура фантома:



Фантомы в двумерной решетке

Поперечные колебания квадратной однородной гармонической решетки.

Энергетический вихрь — кольцевое движение фантомов:



Демонстрация сохранения момента импульса.

Расчеты Н.М. Бессонова.

Дисперсия массы и энергии

- Система свободных частиц

$$m_n \ddot{x}_n = 0.$$

- Статический момент

$$\mu = \sum_{n=1}^N m_n x_n.$$

- Момент инерции

$$\theta = \sum_{n=1}^N m_n x_n^2.$$

- Цепочка Гука ($n \in \mathbb{Z}$)

$$m_e \ddot{u}_n = C(u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}).$$

- 1й момент энергии

$$M_1 = \sum_n E_n \xi_n.$$

- 2й момент энергии

$$M_2 = \sum_n E_n \xi_n^2.$$

$$\xi_n = an.$$

Дисперсия массы и энергии

- Система свободных частиц

$$m_n \ddot{x}_n = 0.$$

- Момент инерции

$$\theta = \sum_{n=1}^N m_n x_n^2.$$

- Центральный момент инерции

$$\theta = \sum_{n=1}^N m_n (x_n^2 - x_c^2).$$

- Цепочка Гука ($n \in \mathbb{Z}$)

$$m_e \ddot{u}_n = C(u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}).$$

- 2й момент энергии

$$M_2 = \sum_n E_n \xi_n^2.$$

- 2й центральный момент энергии

$$M_c = \sum_n E_n (\xi_n^2 - x_c^2).$$

Кинетическая энергия

Дифференциальная связь тензора инерции и кинетической энергии

$$\ddot{\theta} = 4K.$$

Доказательство (для системы свободных частиц):

$$\ddot{\theta} = 2 \sum_{n=1}^N m_n (x_n \dot{x}_n) = 2 \sum_{n=1}^N m_n (x_n \ddot{x}_n + \dot{x}_n^2) = 2 \sum_{n=1}^N m_n v_n^2 = 4K = \text{const.}$$

Центральные величины

$$\theta = \theta_c + mx_c^2, \quad K = K_c + \frac{1}{2}mv_c^2, \quad \ddot{\theta}_c = 4K_c.$$

K_c характеризует энергию разлета частиц относительно центра масс.

Кинетическая энергия



K_c характеризует
кинетическую энергию
разлета частиц относительно
центра масс облака

Радиус инерции и энергетический радиус

- Радиус инерции

$$\rho = \sqrt{\frac{\theta_c}{m}}.$$

- Энергетический радиус

$$\rho = \sqrt{\frac{M_c}{E}}.$$

- Кинетическая энергия системы

$$K_c = \frac{1}{4} \ddot{\theta}_c = \text{const.}$$

- Кинетическая энергия фантома

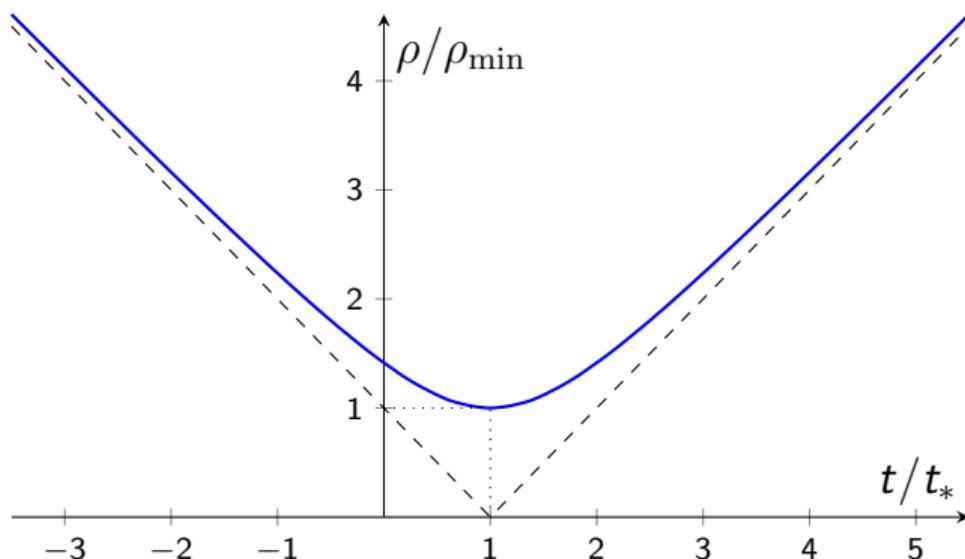
$$K_c = \frac{1}{4c^2} \ddot{M}_c = \text{const.}$$

Скорость дисперсии

$$v_\rho = \sqrt{\frac{2K_c}{m}} \quad \Leftrightarrow \quad K_c = \frac{mv_\rho^2}{2}.$$

Изменение радиуса

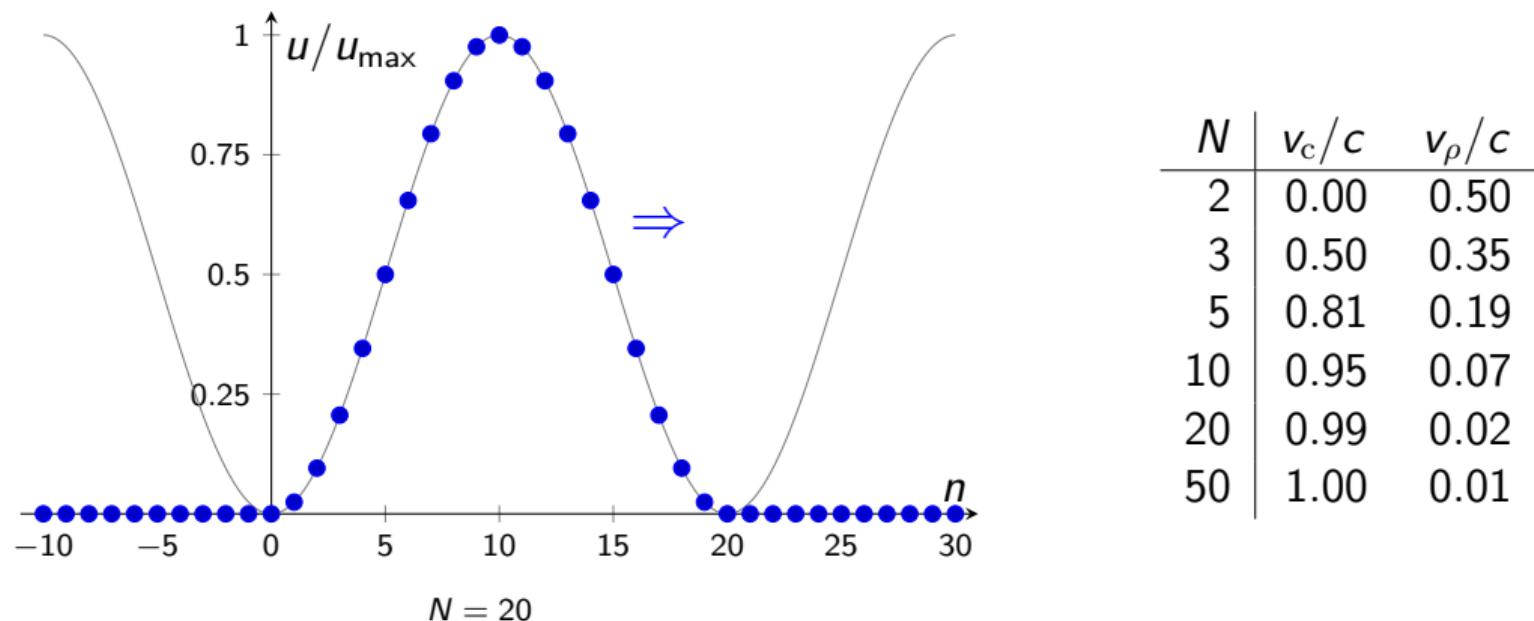
Зависимость радиуса от времени: $\rho = \sqrt{\rho_{\min}^2 + v_\rho^2(t - t_*)^2} \approx v_\rho |t - t_*|$.



Зависимость справедлива как для радиуса инерции, так и для энергетического радиуса.

Эволюция фантома (1D)

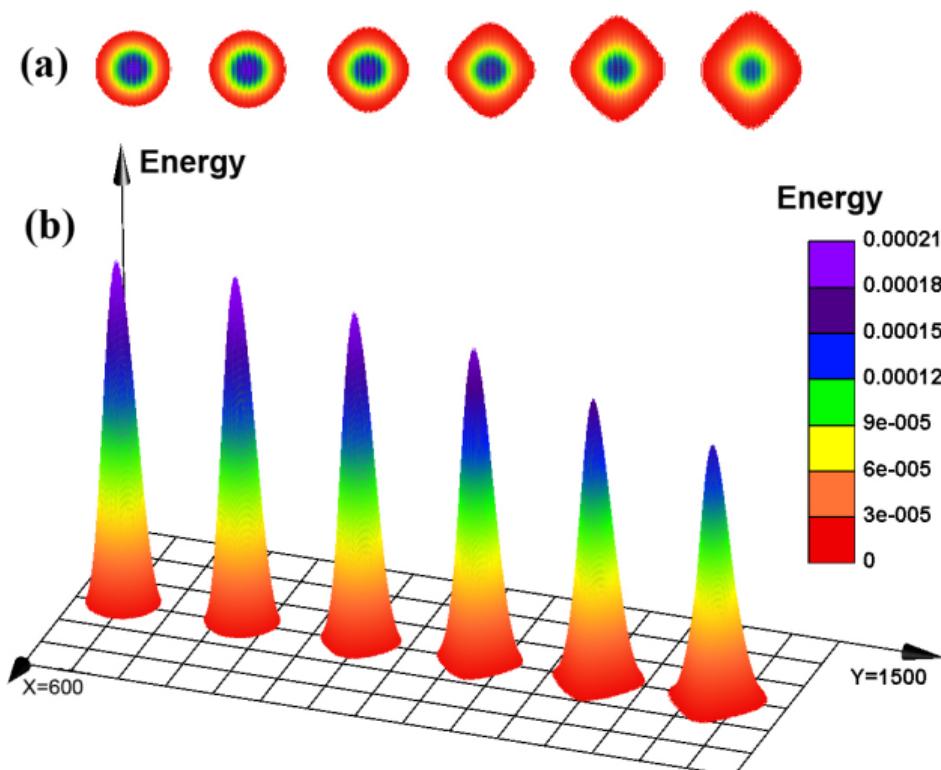
Фантом на основе единичной синусоидальной волны.



Эволюция фантома (2D)

Движение и дисперсия
фантома в двумерной
квадратной решетке.

Расчеты Н.М. Бессонова.



Применение энергетической динамики к описанию квантовых, электромагнитных и релятивистских явлений

Основной принцип

- Все, что нами воспринимается как материя, является энергетическими телами, перемещающимися по некоторому носителю.
- Для носителя материя является фантомом (распределением энергии), то есть иной субстанцией, чем сам носитель.
- Для нас носитель не является материей, а выполняет роль вместилища (по сути, пространства), в котором происходит движение материи.

Принцип матрешки (иерархия миров)

- Материя может выступать в качестве носителя, тогда фантомом для нее является любое распределение энергии, в частности таковыми являются квазичастицы, используемые для описания переноса тепла в кристаллах. Это наш мир.
- Материя является фантомом для некоторого носителя. Поэтому частицы материи – фотоны, элементарные частицы и пр. являются квазичастицами для этого носителя.
- Истинные частицы носителя, если таковые имеются, могут быть квазичастицами для носителя следующего уровня, для которого носитель нашего мира является фантомом.
- Подобная иерархия может выстраиваться до бесконечности:

носитель 1 → фантом 1 ≡ носитель 2 → фантом 2 ≡ носитель 3 → фантом 3 ...

- О подобной цепочке говорил П. А. Жилин, называя ее иерархией эфиров.

Вопросы — ответы

Сформулируем на основе принципов энергетической динамики
ответы на ряд открытых вопросов современной физики

Что такое корпускулярно-волновой дуализм?

- Фантом, изначально локализованный в носителе, перемещается с постоянной скоростью, постепенно расширяясь.
- От начальных условий зависит, что превалирует – движение или расширение.
- Если скорость движения значительно выше скорости расширения, то фантом воспринимается как частица.
- В обратном случае поведение фантома напоминает волны Гюйгенса, для которых каждая точка фронта становится зародышем новой волны.

В чем природа гравитации?

- Если фантом обладает достаточно высокой энергией, то это приводит к деформированию носителя.
- В деформированном носителе скорость фантомов перестает быть постоянной, что воспринимается, как воздействие гравитационной силы.
- Этим, в частности, объясняется дальнодействие, свойственное гравитации.

Как может искривляться пространство?

- Пространством для фантома является структура носителя.
- Если фантом обладает достаточно высокой энергией, то это приводит к деформированию носителя, что и воспринимается, как искривление пространства.
- Этим объясняется искривление пространства массивными телами, описываемое общей теорией относительности.

Как может замедляться время?

- Время для фантома отсчитывается по колебаниям частиц носителя.
- Нелинейным колебаниям свойственно снижение частоты при увеличении амплитуды.
- Если фантом обладает достаточно высокой энергией, то это приводит к снижению частоты колебаний, что и воспринимается, как замедление времени.
- Этим объясняется замедление времени в гравитационном поле массивных тел, описываемое общей теорией относительности.

Как свет может распространяться в пустоте?

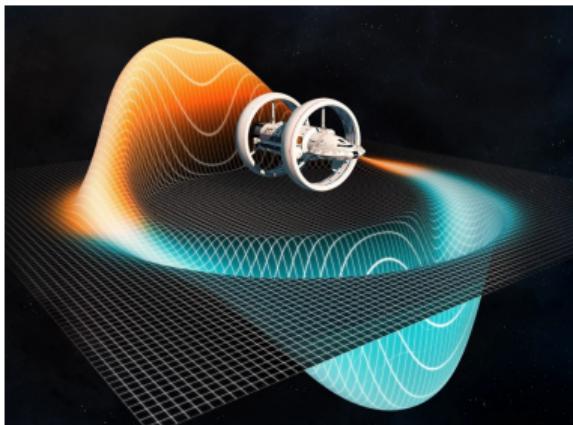
- Пустоты нет, пространство заполнено носителем.
- Свет (электромагнитные волны) — это энергия, распространяющаяся в носителе.
- Для наблюдаемых длин электромагнитных волн скорость движения соответствующего фантома значительно превышает скорость расширения, что объясняет корпускулярные свойства света.

Почему не был обнаружен эфир?

- При попытках найти эфир он воспринимался как материя, разновидность вещества.
- На самом деле эфир для вещества является носителем, вещество же для эфира является фантомом (распределением энергии).
- Носитель и фантом, а, значит, вещество и эфир — это физически абсолютно разные субстанции.
- Этим, в частности, объясняется, как вещество может беспрепятственно перемещаться в эфире.

Почему невозможно движение быстрее скорости света?

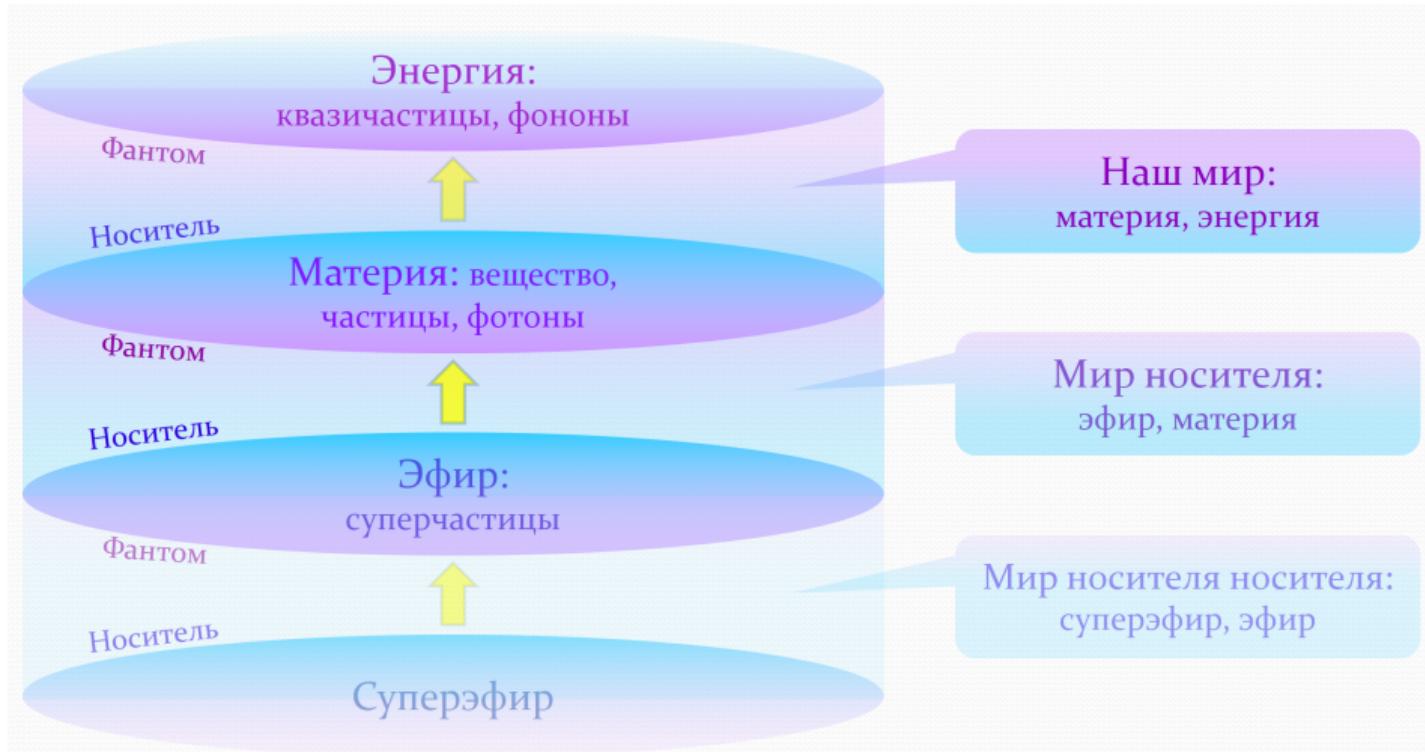
- Любое движение материи — это распространение энергии в носителе.
- В линейной теории энергия не может распространяться быстрее максимальной скорости распространения волн в носителе.
- В нелинейной теории возможно более быстрое распространение нелинейных волн, но оно сопряжено с деформированием носителя, а, значит, искривлением пространства.

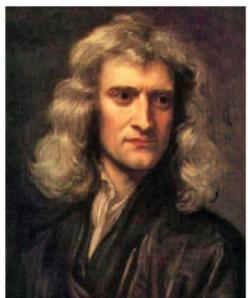


Пример: метрика Алькубьерре — решение уравнений общей теории относительности.

M. Alcubierre. The warp drive: hyper-fast travel within general relativity. Classical and Quantum Gravity. 1994. **11** (5), 73–77.

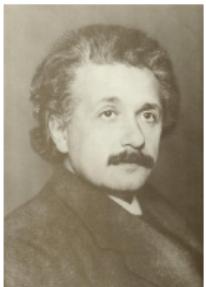
Иерархия миров





Невозможно представить, чтобы неодушевленная грубая материя (без посредства чего-то еще, что материей не является) могла действовать на другую материю без взаимного соприкосновения с ней... Тяготение должно вызываться неким агентом, постоянно действующим по определенным законам, а *материален этот агент или нематериален*, я предоставляю судить моим читателям.

*И. Ньютон. Письмо Ричарду Бентли. Кембридж.
25 февраля 1693.*



Согласно общей теории относительности *пространство без эфира немыслимо*; в таком пространстве не только бы не было никакого распространения света, но и не могли бы существовать никакие стандарты пространства и времени... Но этот *эфир не может рассматриваться как* наделенная какими-либо качественными характеристиками *весомая среда*.

*А. Эйнштейн. Эфир и теория относительности.
Речь, произнесенная 5 мая 1920 г. в Лейденском университете.*

Спасибо за внимание!

Дополнительная информация: tm.spbstu.ru/TC