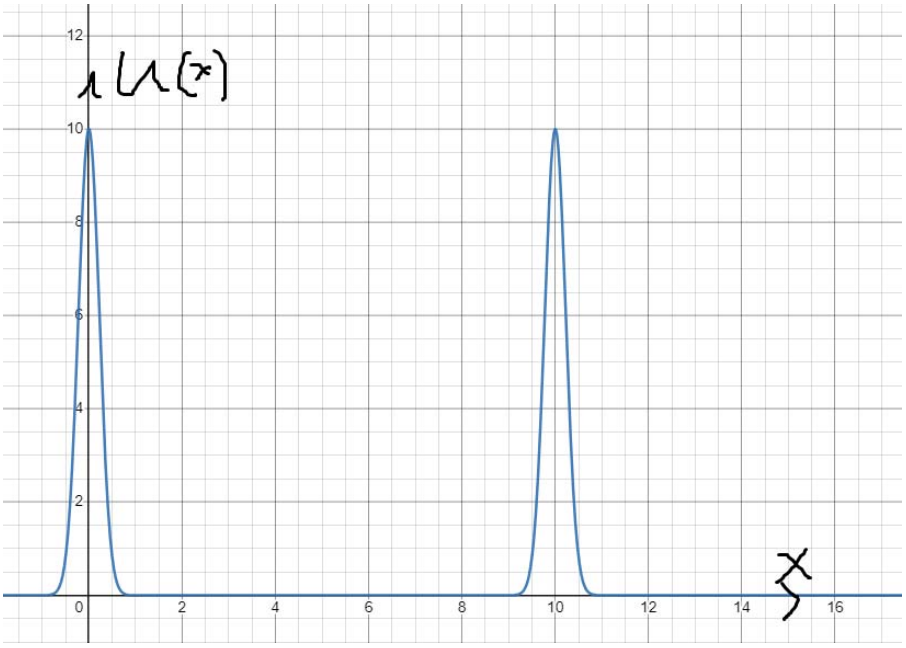
Поговорим про резонансы. Те самые короткоживущие частицы из ядерки:

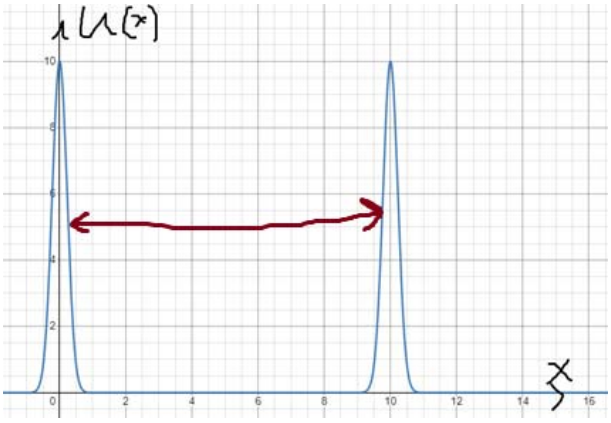
Частица	Кварковый состав	Масса, Mc^2 (МэВ)	Время жизни (сек) или ширина	Спин-четность, изоспин $J^P(I)$	Основные моды распада
J/ψ	$c\bar{c}$	3097	91 кэВ	1-(0)	адроны, e^+e^-,$\mu^+\mu^-$
Υ	$b\bar{b}$	9460	53 кэВ	1-(0)	$\tau^+\tau^-$,e^+e^-,$\mu^+\mu^-$

Рассмотрим вот такой потенциал:



Два барьера. Полагаю, ямой называть это уже неправильно. Пусть будет «боксёрский ринг».

В классике частица будет бегать туда-сюда между стенками:

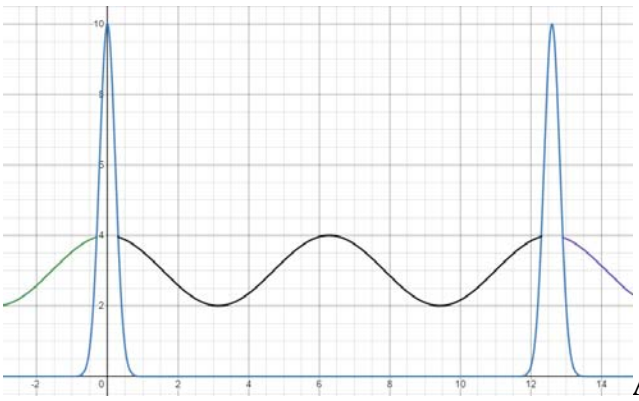


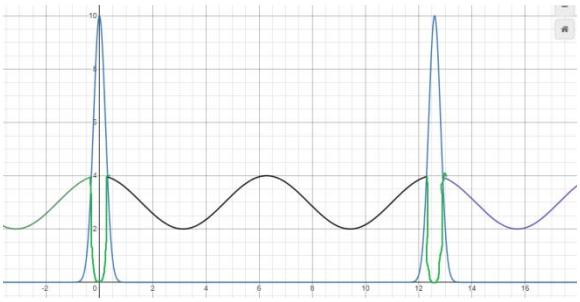
Иная ситуация в квантах. Мы знаем про туннелирование и частица будет потихоньку «утекать» через стенки.

Давайте прикинем, как будет выглядеть решение стационарного уравнения Шрёдингера:

$$\frac{\frac{\partial^2 \Psi(x)}{dx^2}}{2m} + U(x)\Psi(x) = E\Psi(x)$$

На большей части прямой $U(x) = 0$, и решение там будет синус-косинус:


А вот там, где потенциал устремляется ввысь, вероятность встретить частицу меньше всего:



Добавим зависимость от времени (т.е. домножим на $e^{-\Gamma t}$)

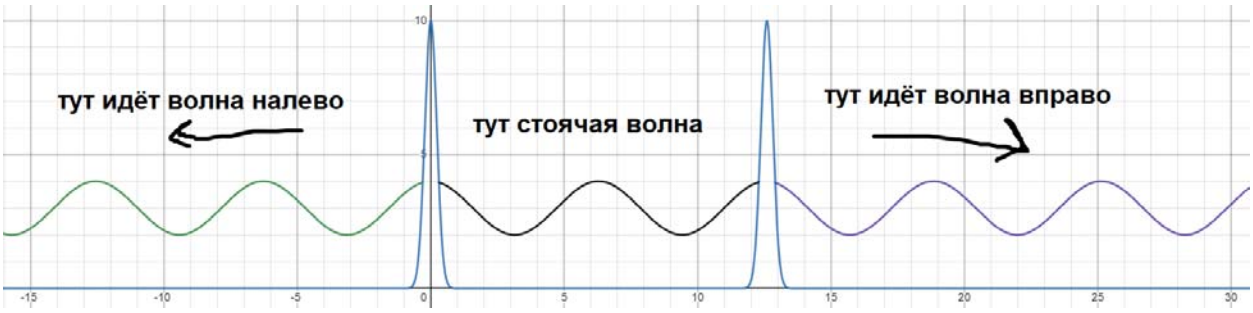
$$\text{левее левого барьера } \Psi(x,t) = e^{-\Gamma t} e^{i(kt+\omega x)}$$

$$\text{правее правого барьера } \Psi(x,t) = e^{-\Gamma t} e^{i(kt-\omega x)}$$

$$\text{между барьерами } \Psi(x,t) = A e^{-\Gamma t}\left(e^{i(kt+\omega x)} + e^{i(kt-\omega x)}\right)$$

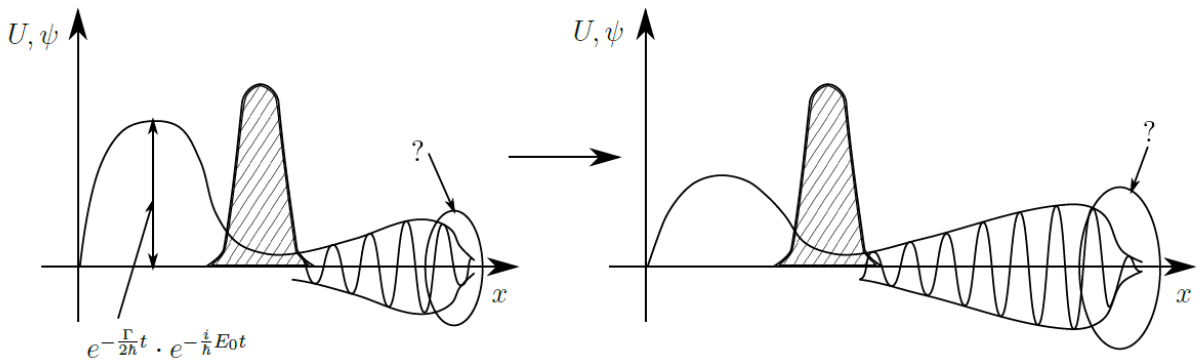
Г – ширина распада (зависит от высоты барьеров и их ширины).

Обсудим физический смысл! $e^{i(kt+\omega x)}$ - это волна, идущая налево, $e^{i(kt-\omega x)}$ - волна, идущая вправо. Эскиз рисунка:



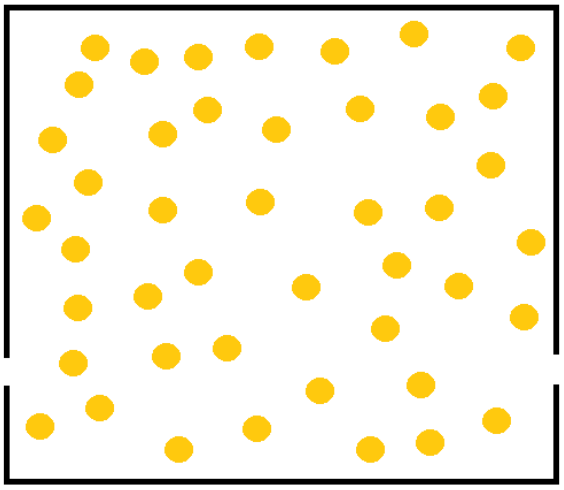
Т.е. из «боксёрского ринга» будут исходить волны. При этом ВФ также домножается на $e^{-\Gamma t}$. Это означает, что модуль ВФ падает. И это объясняется физическим смыслом: изначально частица была локализована в «боксёрском ринге», а потом она потихоньку туннелирует через стенки и выходит на волну. В результате вероятность того, что частица остаётся в «боксёрском ринге», экспоненциально падает с ростом времени.

Из-за этого и исходящие волны со временем ослабевают, потому что ослабевает их источник:

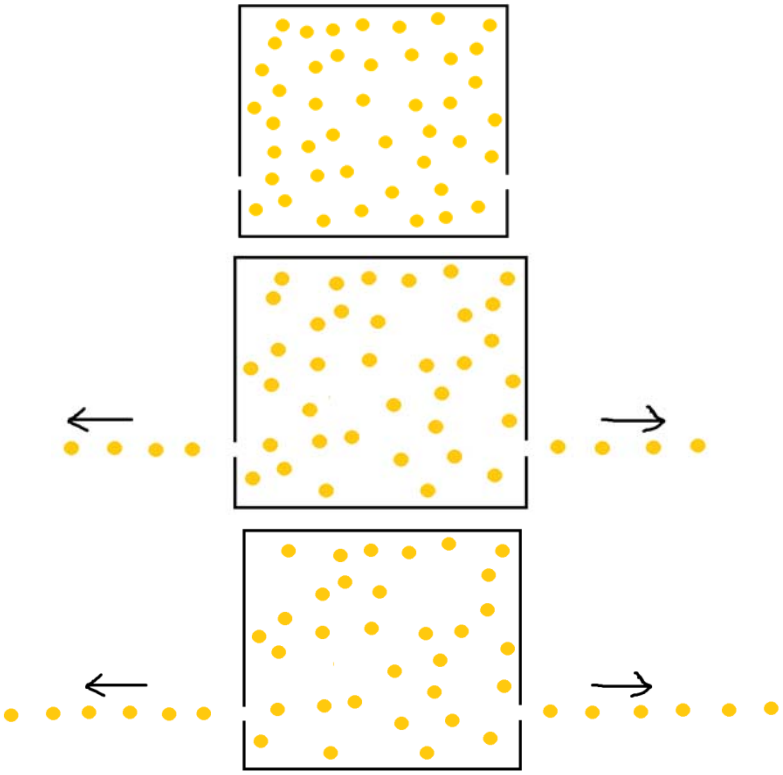


? – потому что у волны есть фронт, и что там происходит, мы описывать не будем.

Классическая аналогия: ящик с молекулами в вакууме с двумя дырками:



Тут точно также молекулы будут потихоньку вылетать струйками из через дырки, а внутри ящика число молекул будет экспоненциально убывать:



Силаев говорит, что метастабильные частицы имеют комплексную энергию. Почему? Ещё раз посмотрим на решение:

$$\text{левее левого барьера } \Psi(x,t) = e^{-\Gamma t} e^{i(kt+\omega x)}$$

$$\text{правее правого барьера } \Psi(x,t) = e^{-\Gamma t} e^{i(kt-\omega x)}$$

$$\text{между барьерами } \Psi(x,t) = Ae^{-\Gamma t}(e^{i(kt+\omega x)} + e^{i(kt-\omega x)})$$

Перепишем его как

$$\text{левее левого барьера } \Psi(x,t) = e^{i((k+\Gamma i)t+\omega x)}$$

$$\text{правее правого барьера } \Psi(x,t) = e^{i((k+\Gamma i)t-\omega x)}$$

$$\text{между барьерами } \Psi(x,t) = A(e^{i((k+\Gamma i)t+\omega x)} + e^{i((k+\Gamma i)t-\omega x)})$$

Для обычной часы в яме, откуда она не утекает, $k = \frac{E}{h}$ Но у нас в роли k выступает $k + \Gamma i$. Вот и получается как бы «комплексная» энергия. Но это всё лишь условность – это попытка объяснить нестационарное состояние, делая вид, что у нас стационарное. Вот и приходится изголяться.

Вопрос. Клёнов на лекции говорил, что в этом случае оператор Гамильтона уже не будет эрмитов. Так ведь?
Ответ: Это теорема из линала: оператор эрмитов ⇔ все его СЗ действительны. Как они стали комплексны, он уже не эрмитов.
Зачем это нужно знать? На практике эта эрмитовость нафиг не нужна, однако сей факт очень любят спрашивать допвопросом на экзамене, так что запомните.

Вопрос. А куда «утекают» те самые редкие частицы-резонансы?

Частица	Кварковый состав	Масса, Мс^2 (МэВ)	Время жизни (сек) или ширина	Спин-четность, изоспин $J^P(I)$	Основные моды распада
J/ψ	$c\bar{c}$	3097	91 кэВ	1-(0)	адроны, e^+e^-,$\mu^+\mu^-$
Υ	$b\bar{b}$	9460	53 кэВ	1-(0)	$\tau^+\tau^-$,e^+e^-,$\mu^+\mu^-$

Ответ: вообще говоря, утекают в другие частицы (а не по пространству, а то некоторые уже представили, как таон растекается по всей Дубне). Просто там пространство не координатное, а частичное (от слова «частица»). Если вы читаете эту методичку в 5 семе к атомке, это будет сложно объяснить, но я попытаюсь. ВФ уже является ф-ций не координат x,y,z,t, а функцией частиц: $\Psi(p_{\text{частица1}}, p_{\text{частица2}}, t)$. Пусть частица 1 короткоживуща, а частица 2 живёт долго. Пусть изначально у нас была 100% (инфа сотка!) частица 1: $\Psi\left(p_{\text{частица1}}, p_{\text{частица2}}, t = 0\right) = \delta(1,0,t = 0)$. А далее она (в результате эволюции, под действием некоего гамильтониана, вызывающего измененик ВФ) начинает

эволюционировать, например, по закону (пишу от балды практически):
$\Psi\left(p_{\text{частица1}}, p_{\text{частица2}}, t\right) = Ce^{-\left(p_{\text{частица1}} - \Gamma t\right)^2}$.