ЧТО СТУДЕНТ-- ФИЗИК ДОЛЖЕН ПОНИМАТЬ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ЭПИДЕМИЙ

Рассмотрим систему из вирусов, распространяющихся по своим носителям, так что каждый новый зараженный носитель увеличивает на единицу число доступных этой системе состояний. Исходя из формулы Больцмана для энтропии S произвольного мАкросостояния такой вирусной системы, как логарифма числа реализующих его мИкросостояний $S = \ln Z$, можем понимать под Z непосредственно число зараженных носителей. Так что эта вирусная система НЕ является замкнутой, а находится под постоянным внешним воздействием своих потенциальных носителей, увеличивающих число ее возможных мИкросостояний вследствие своего неразумного поведения, и потому она далека от своего равновесия. Поскольку в этом случае ее энтропия со временем может только возрастать, то согласно принципу Пригожина все, что может в таких условиях сама вирусная система, находясь в таком стационарно-неравновесном мАкросостоянии – это минимизировать скорость роста своей энтропии как $K = \min\left(\frac{dS}{dt}\right)$. Полагая, что эволюция этой система стартовала НЕ из точки ее фазового перехода, считаем энтропию регулярной функцией времени t, и, следовательно, разложимой при “малых” t в ряд Тейлора в точке $t = 0$ в виде $S(t) = S_0 + Kt$. В итоге:

$$Z(t) = Z_0 e^{Kt}. \qquad \textbf{(0)}$$

Время – <u>размерная физическая величина</u>. Предположенная его “малость” – это малость в масштабе некоторого характерного времени данного процесса. Здесь это время: $\tau = \frac{1}{K}$, т.е. $t \le \tau$. Таким образом, приведенный анализ описывает лишь начальную стадию распространения эпидемии. Как мы сейчас увидим, он соответствует термодинамическому пределу более полного описания, учитывающего, прежде всего **конечность** числа N потенциальных носителей, как населения **закрытой** страны (города, района, области) площадью Σ.

Действительно, прирост числа зараженных носителей dZ за время dt пропорционален: полному числу Z зараженных уже в этот момент, вероятности каждому из них встретиться с еще ни разу не заражавшимся $\frac{N-Z}{N} = 1 - \frac{Z}{N}$, числу таких встреч в единицу времени -- их частоте $\dot{\nu}$ и вероятности $0 \le \eta \le 1$ собственно заражения при каждой такой “эффективной” встрече собственно с вирусом, зависящей от возможного изначально имеющегося иммунитета.

Таким образом: $dZ = Z\left(1 - \frac{Z}{N}\right)Kdt$, где теперь $K = \eta\dot{\nu}$ при $\dot{\nu} = \bar{n}\bar{u}\sigma$. Здесь в полной аналогии с частицами: $\bar{n} = \frac{N}{\Sigma}$ -- средняя плотность населения на территории площадью Σ; $\bar{u}$ -- средняя абсолютная величина относительной скорости сближения двух человек (ансамбль, по которому они усредняются, нам неизвестен);

$\sigma = \sigma(\ell) = \ell_0\theta(\ell_0 - \ell) = \left\{\begin{matrix} \ell_0, & \ell < \ell_0 \\ 0, & \ell > \ell_0 \end{matrix}\right\}$ -- “эффективное сечение заражения”, чья “эффективность” определяется расстоянием ℓ_0, на которое распространяется вирус от каждого зараженного носителя, и чья размерность длины как раз соответствует двумерной “задаче рассеяния” – в плоскости.

Так что: $Kdt = \frac{N}{Z}\frac{dZ}{(N-Z)} = d\ln\left(\frac{Z}{N-Z}\right)$, откуда $Z(t) = \frac{N}{1+Ce^{-Kt}}$,

и начальные условия $Z(0) = Z_0$ дают $C = \frac{N-Z_0}{Z_0}$.

Таким образом: $$Z(t) = \frac{N}{1+\frac{N-Z_0}{Z_0}\exp(-Kt)} = \frac{NZ_0e^{Kt}}{N-Z_0+Z_0e^{Kt}}, \qquad \textbf{(1)}$$

где величина: $K = \eta\dot{\nu} = \eta\bar{n}\bar{u}\sigma = \frac{1}{\tau}$, также имеет размерность $\frac{1}{t}$. **(2)**

Имея при $t=0$ одного зараженного $Z_0 = 1$, и ничего не предпринимая, через время t

получим $$Z(t) = \frac{Ne^{Kt}}{N-1+e^{Kt}}. \qquad \textbf{(3)}$$

При $t \to \infty$ в любом случае имеем $Z(\infty) = N$. Т.е. для заражения всего населения необходимо бесконечное время.

Однако для заражения половины населения потребуется вполне конечное время

$$T_{1/2} = \tau\ln\left(\frac{N-Z_0}{Z_0}\right) \le \tau\ln N >> \tau. \qquad \textbf{(4)}$$

В термодинамическом пределе $N \to \infty$, $\Sigma \to \infty$ при $\bar{n} = const$, очевидно, приходим в **(1)** к предыдущей формуле **(0)** как $Z(t) = Z_0e^{Kt}$. Видно, что характерное время τ, т.е. коэффициент K в показателе этим пределом не затрагивается. Это же выражение **(0)** получается, если в знаменателе последней формулы **(1)**, считая $Kt << 1$ заменить $e^{Kt} \to 1$. Т.е. в соответствии с вышесказанным именно термодинамический предел делает начальную экспоненциальную эволюцию нашей вирусной системы необратимой.

Также видно, что для остановки эпидемии нужно сделать коэффициент K в показателе экспоненты равным нулю и продержать его таким до выздоровления или изоляции последнего зараженного в данной **закрытой** области Σ.

Согласно его выражению **(2),** для этого имеется три способа, связанные каждый -- со своим физическим параметром:

- **i)** положить $\bar{u} \to 0$, усадив все население по домам и прекратив его передвижение;
- **ii)** положить $\eta \to 0$, одев на каждого защитную маску, экран и перчатки;
- **iii)** положить $\sigma \to 0$, разведя людей на социальную дистанцию $\ell > \ell_0$, большую опасной величины ℓ_0.

Отказ от использования всех трех способов неизбежно снова запускает формулы **(1)--(4).** А их успешная реализация (Китай, Ю. Корея, Япония) позволяет остановить эпидемию.

Не менее коварным параметром в формуле **(2)** для K является плотность $\bar{n}$ населения. Отличаясь примерно на два порядка в европейской части нашей страны и за Уралом, она приводит к такому же отличию в характерных временах τ для разных регионов, где за Уралом оно оказывается во столько же раз больше.

Качественно характерная форма сглаженной ступеньки, даваемая формулами **(1), (3)** рассмотренной модели**,** вполне прослеживается для стран, уже справившихся с эпидемией https://gisanddata.maps.arcgis.com/apps/opsdashboard/index.html?fbclid=IwAR2ZzF8RMjQCzuaARyW1tZzcNFrVhCdOxHI5TSZVr4VCgoY4LZrdf50fv9g#/bda7594740fd40299423467b48e9ecf6 а также в экспериментальных данных по числу выздоровевших https://www.covidvisualizer.com/ , которое с определенным коэффициентом подобия, равным $(1-\xi)$, должно воспроизводить найденную кривую заражения.

В связи с этим замечанием приведенную модель можно уточнить, учтя также эффективность системы здравоохранения, путем введения коэффициента "НЕвыздоровления" $\xi < 1$. Тогда число реально зараженных в данный момент времени будет равно $\xi Z < Z$, т.е. во столько раз меньше полного числа Z когда либо заражавшихся. Исходное дифференциальное уравнение тогда примет вид: $dZ = \xi Z\left(1 - \frac{Z}{N}\right)Kdt$, или: $\xi Kdt = \frac{N}{Z}\frac{dZ}{(N-Z)} = d\ln\left(\frac{Z}{N-Z}\right)$, а его решение

$$Z(t) = \frac{N}{1 + \frac{N - Z_0}{Z_0}\exp\left(-\tilde{K}t\right)}, \qquad \textbf{(5)}$$

т.е. для постоянного ξ отличается от **(1)** лишь заменой K на $K \to \tilde{K} = \xi K < K$. В реальности коэффициент ξ, конечно, сложно определить: он зависит как от времени t, так и от страны (города, области), т.е, от способа выделения **закрытой** области Σ и реальной степени ее закрытости, и можно оперировать лишь некоторой усредненной его величиной, либо моделировать численно его явную зависимость от времени. Для этого придется использовать решение дифференциального уравнения **(5)** самого общего вида -- при $\tilde{K} = \tilde{K}(t) = \xi(t)K(t)$, где Z_0 -- есть по-прежнему число зараженных носителей вируса в начальный момент времени $t = 0$:

$$Z(t) = \frac{N}{1 + \frac{N - Z_0}{Z_0}\exp\left\{-\int_0^t \tilde{K}(s)ds\right\}}. \qquad \textbf{(6)}$$

Выводы.

1. Энтропия слепа, но неумолима.
2. Изучение студентами физики способствует их выживаемости в современных условиях.
3. Будучи важнейшим параметром эволюции социальных систем и исторических процессов, **время** является также важнейшей физической величиной с имманентно присущей ей **физической** размерностью. Это, в свою очередь, неизбежно привносит в описание этих систем и процессов также и другие -- размерные чисто физические величины и связанные с ними "социально-физические" понятия, такие как использованные выше $\dot{\nu}, \bar{n}, \bar{u}, \sigma, \eta$, и т.д.