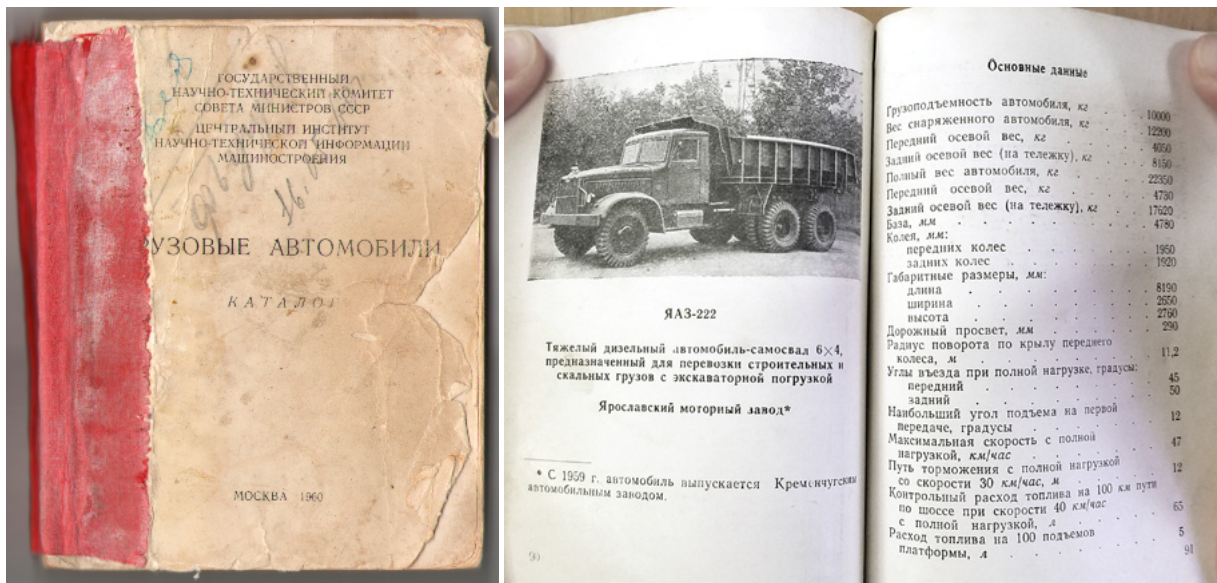


Цивилизация Пружин

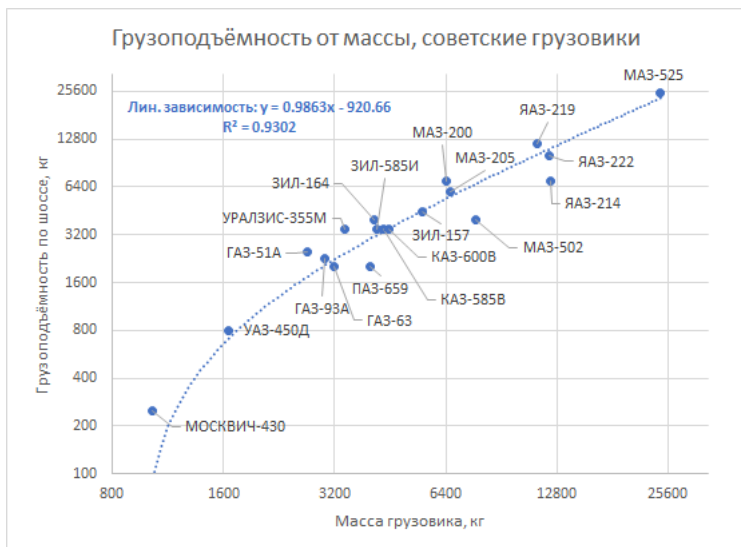
Часть 1/5. Золотое "Ку"

Лет в шесть мне попался в руки дедовский справочник^[50] по грузовым автомобилям середины 20-го века. Добротный, напечатанный на гладкой плотной бумаге раритет. Единственное, что осталось на память от деда после распада страны, войн и переездов.



Благодаря чтению справочника понятие "грузоподъемность" вошло в мой лексикон с раннего детства. Так что, когда отец упомянул, что любой грузовик весит столько же, сколько увозит сам, я это запомнил и, много позже заинтересовался.

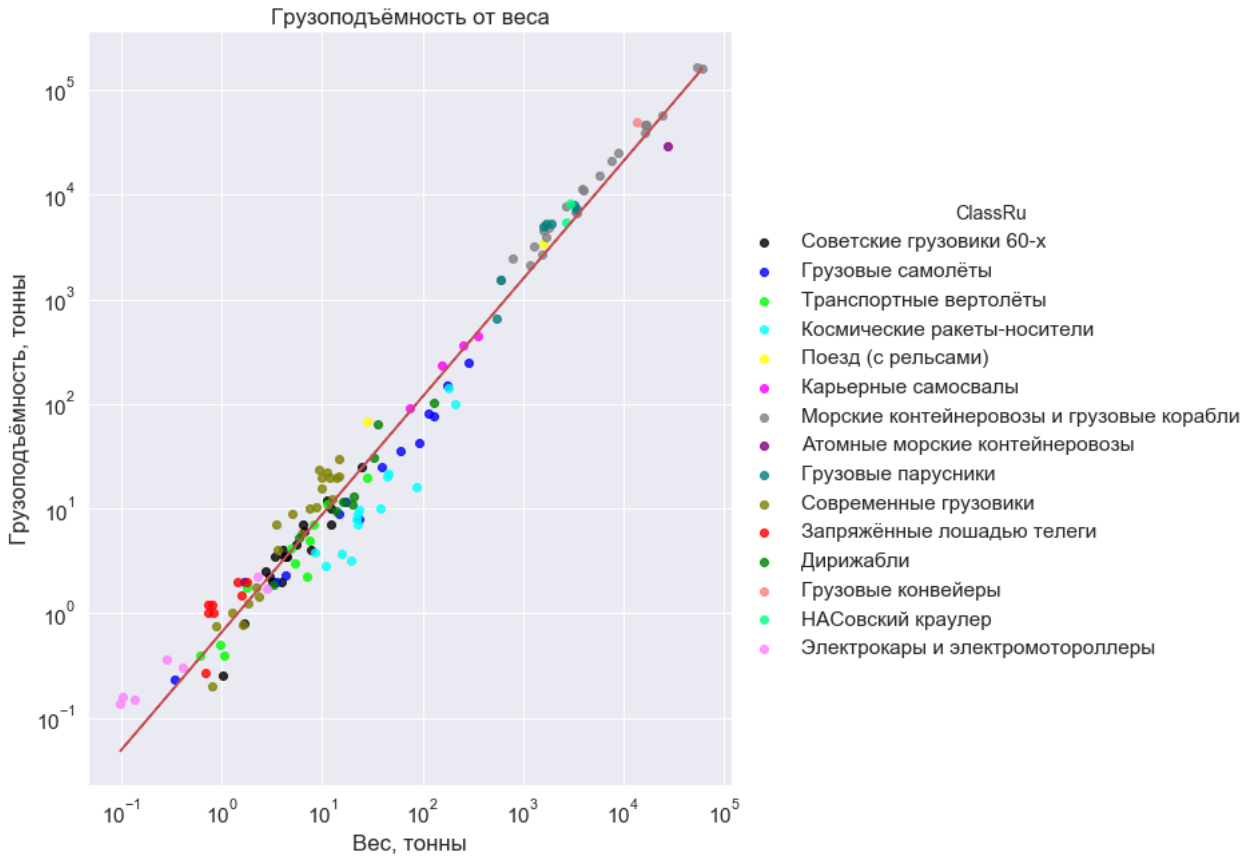
Отец был прав. Для грузовиков 60-х годов это правило соблюдается с весьма приличной точностью:



Гораздо любопытнее, что эта закономерность неплохо соблюдается и для куда более широкого класса транспортных средств.

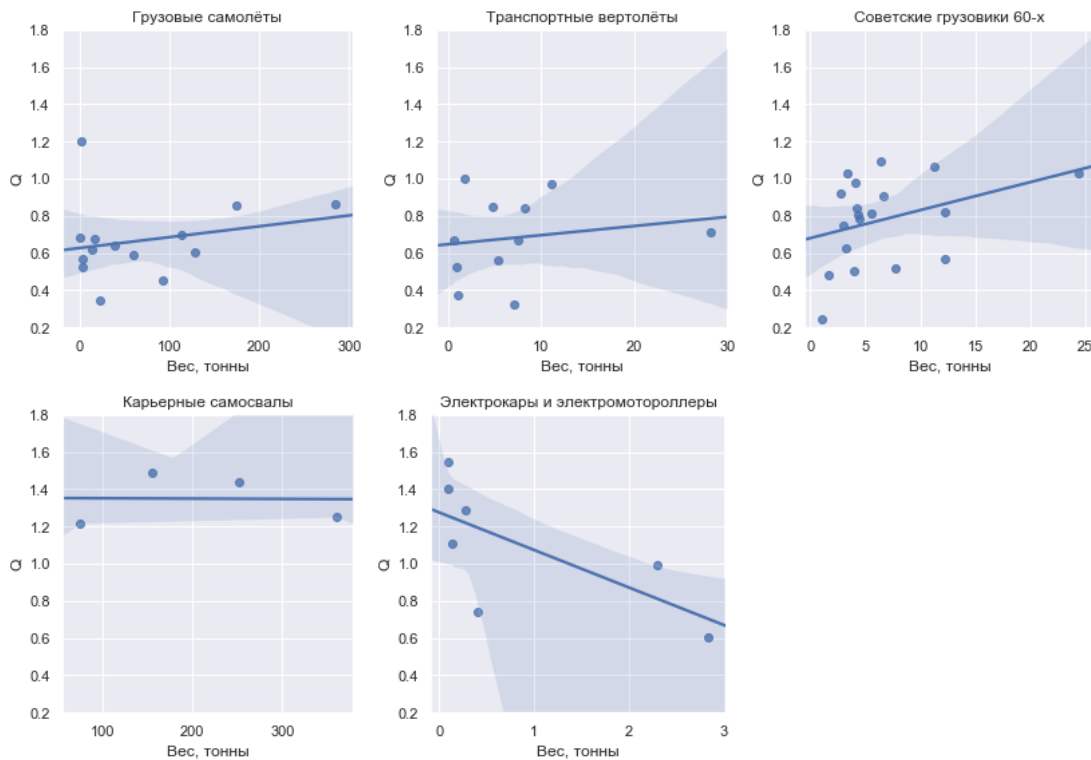
Сначала я нанёс на график грузовые самолёты. Удивился. Стал добавлять другие транспортные средства. Ездящие, плавающие и летающие, построенных в веках 19-м, 20-м, и 21-м, работающие на энергии тепловой, атомной, ветровой и даже конной. Результат? Слабо степенная (показатель 1.125), если не просто линейная, зависимость. На массах от сотни килограмм до шестидесяти тысяч тонн. С отклонениями, конечно, куда же без них, до 10 раз иногда, но на шести порядках масс это, очевидно, мелочи.

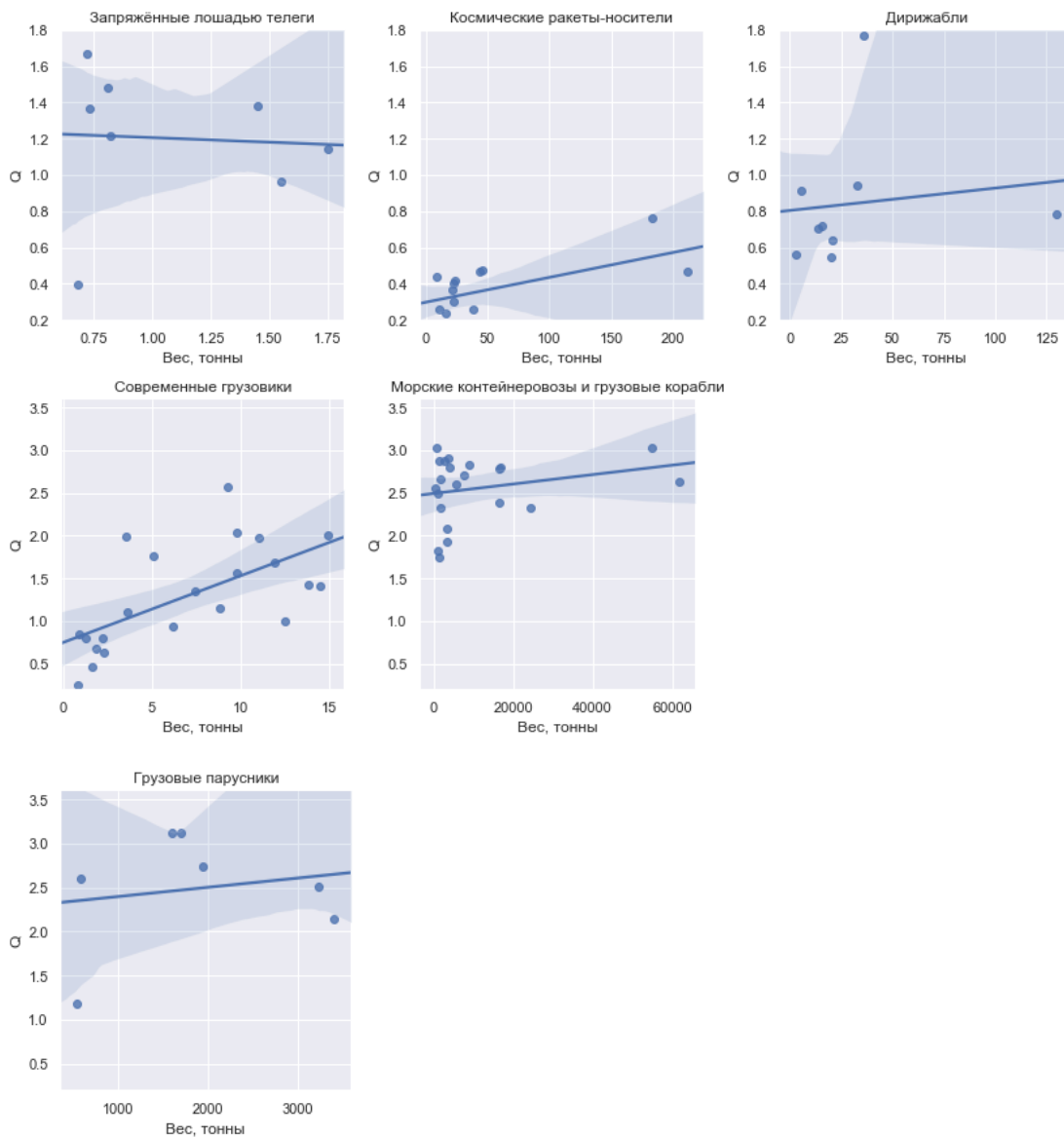
Вот она, эта зависимость, жмущаяся к диагонали необъятного пустого поля:



На графике отметились: грузовые самолёты; транспортные вертолёты; дирижабли, современные и начала века; космические ракеты-носители (на низкую орбиту); советские грузовики 60-х; современные карьерные самосвалы; современные грузовики России, США, Китая и Индии; электрические кары и грузовые мотороллеры; поезда (с рельсами); атомные контейнеровозы; морские контейнеровозы и грузовые корабли (не танкеры); парусные грузовые корабли 17-20 веков; конвейерные ленты для передачи руды; насовский тягач для вывоза ракет на старт; и, наконец, телеги, запряжённые лошады.

Если ввести величину Q , определяемую как масса перевозимого груза по отношению к сухой массе транспортного средства, то вот как она выглядит для каждой из групп:





В цифрах средние значения Q составляют:

Класс средств	Average Q	Standard Deviation Q
Грузовые самолёты	0.667	± 0.206
Транспортные вертолёты	0.682	± 0.225
Дирижабли, современные и начала века	0.843	± 0.375
Космические ракеты-носители (низкая орбита)	0.372	± 0.156
Советские грузовики 60-х	0.777	± 0.232
Современные карьерные самосвалы	1.350	± 0.137
Современные грузовики России, США, Индии, Китая	1.294	± 0.604
Электрические карты и грузовые мотороллеры	1.098	± 0.344
Поезд (с рельсами)	2.276	± 0.206
Атомные контейнеровозы	1.035	± NA
Морские контейнеровозы и грузовые корабли (не танкеры)	2.556	± 0.378
Парусные грузовые корабли 17-20 веков	2.488	± 0.672
Грузовые конвейерные ленты	3.704	± NA
Насовский тягач для вывоза ракет на старт	2.356	± 0.525
Тереги, запряжённые лошады	1.203	± 0.389

Как видно, Q хоть и не везде строго единично, но в рамках каждой группы тяготеет к общему значению, и оно близко к единице.

Возникает гипотеза:

Для транспортных средств:

- Типичных (т.е. массово производящихся и занятых массовыми грузоперевозками)
- Грузовых (не пассажирских, не военных, не развлекательных)
- Самодвижущихся (машина -- ОК, плот -- нет)

- В конфигурации минимально возможной защиты груза от среды передвижения (т.е. открытые грузовики -- да, фургоны -- нет, Энергия -- да, Энергия-Буря -- нет)
- В необходимой для движения и управления комплектации (т.е. электрокар или велосипед -- с человеком, а телега -- с лошадью)

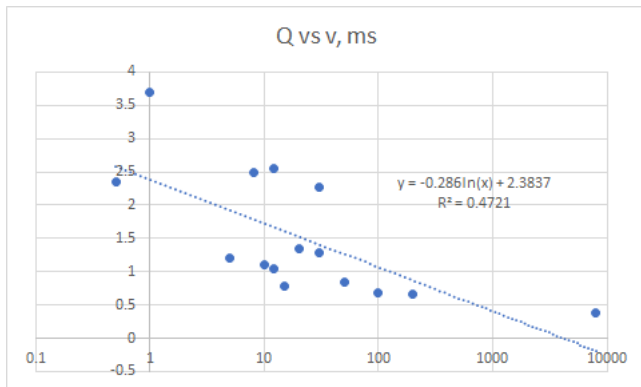
десятичный логарифм отношения грузоподъёмности к "сухой" массе транспортного средства (без топлива) равен в среднем нулю, со среднеквадратичным разбросом около 0.5 (т.е. $Q \approx 1$).

Фраза про разброс означает, что да, встречаются средства с Q , отличным от единицы. Но уже при выходе за $|\text{Log}(Q)| > 1$ они единичны.

Говоря статистически, а какие **систематически** наблюдающиеся значения Q всё-таки нельзя считать близкими к единице? Понятно же, что чем выше разброс значений Q , тем выше вероятность, что видимая на графике «грузоподъёмность-масса» (для групп) линейная зависимость — просто случайность. В зависимости от того, какую вероятность этой случайности Вы считаете пренебрежимо малой, Вы и получите разные «приемлемые» значения отклонения Q от единицы. Так, для вероятности 10^{-11} это ± 3 раза. Для 10^{-9} это ± 10 раз, а для 10^{-8} -- ± 30 . Ну а если бы грузоподъёмность и масса были абсолютно несвязаны, то, деля первое на второе, на имеющихся данных мы получили бы разброс значений Q эдак от 10^{-5} до 10^5 . Мне лично вероятность ошибки 1 к миллиарду кажется ещё приемлемой, поэтому я готов назвать «близкими к единице» любые Q от 0.1 до 10.

Подгонка ли это? Да. Подгонка **описания** под **данные**, то есть наука. Имеются данные, и я подобрал гипотезу, которая их с колоссальной достоверностью описывает. Не путайте с обратным (подгонкой данных под описание).

Кто-то на Хабре предложил учесть зависимость Q от скорости транспортного средства. Вот картинка среднего Q для типичных скоростей каждого транспортнго средства:



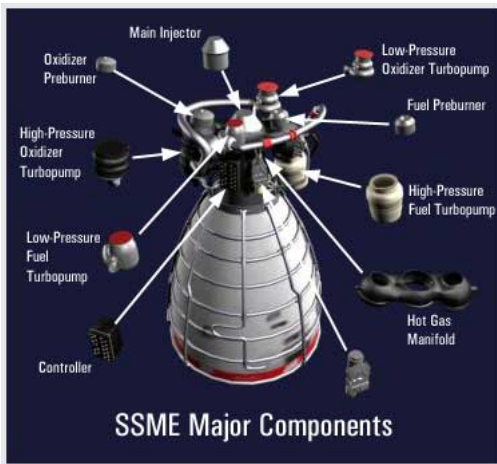
Как видно -- да, есть слабая ($R^2 = 0.47$) зависимость от **логарифма** скорости транспортных средств. И та опирающаяся в основном лишь на три точки. Можно пренебречь.

Наконец, отметим, что включение в рассмотрение поездов с рельсами, электрокаров и конвейерных транспортёров действительно, возможно, является некоторой натяжкой. Однако исключение их из картины сколько-нибудь значимо на результат не влияет.

Что дальше? Эта закономерность показалась мне... загадочной. Почему деревянный парусник, алюминиевый электрокар, и атомный контейнеровоз, вмещающий кучу электрокаров, все поднимают более-менее свой вес? Что заставляет нас создавать транспортные средства с качеством $Q \approx 1$ на массах, различающихся в тысячи раз? Проявление ли это свойств мировой физики, земной экономики, ограничение ли это человеческого интеллекта? Насколько универсален этот закон, будет ли он выполняться для цивилизаций с других звёзд? Вопросы глобальные. Вряд ли их удастся разрешить здесь и сейчас. Но вот рассмотреть и понадукуать, сколько получится, можно и нужно. Этим мы и займёмся.

Мировой рекорд ^[180] подъёма штанги человеком среднего веса превышает 200 кг. Теоретически это означает, что в наше тело заложен запас прочности для рывковых нагрузок по крайней мере до $Q = 2.5$. Однако это требует таких непомерных сил и тренировок, что в повседневной деятельности никогда не применяется. **Целесообразнее** фасовать сахар в мешки по 50 килограмм, хотя это и требует четверо больше грузчиков или ходок. Заметим, что данная ситуация -- результат биологической эволюции, в которой человеческий интеллект участия (почти) не принимал, а следовательно, имеет в ней "алиби".

Физика и инженерия высоких Q в принципе тоже не запрещают. Вон, водородный турбонасосный агрегат для маршевого двигателя Шаттла, та маленькая штучка справа на картинке, развивает мощность в 54 мегаватта ^[60] при вполне автомобильной массе в 350 кг:



[Image credit: [10]]

Если, упрощая, оценивать Q по мощности на килограмм массы, то это раз в 100 выше, чем у приличного автомобиля. Только ведь и стоит эта штука почти как ракета! Дешевле сделать 100 автомобилей с $Q = 1$ и перевезти груз ими, нежели пытаться "обуть" данный агрегат в колёса.

Подобные соображения наводят на мысль: причины здесь экономические. Причём не в узком смысле конкретных экономик и стран (ибо наши устройства порождены самыми разными народами и системами), а скорее в смысле "целесообразности усилий". Целесообразности достаточно универсальной, чтобы, видимо, распространяться на очень разные изделия и где-то даже на животных.

Попробуем исследовать границы этой целесообразности количественно. Поставим вопрос: как стоимость устройства с фиксированной массой зависит от Q ? Вот, допустим, есть самосвал весом в 10 тонн, увозит 10 тонн груза. Мы хотим сделать тоже 10-тонный, но увозящий 20 тонн ($Q = 2$) или даже 50 ($Q = 5$). На том же уровне развития технологий, того же объёма выпуска. Понятно, что большие нагрузки повысят требования и к материалам (сталь \rightarrow титан?), и к двигателям (другие температуры, давления), и к инженерии (меньше допуски на ошибки, более хитрые конструкции). Ясно, что с ростом Q всё будет дороже. Но во сколько раз, по сравнению с десятитонным?

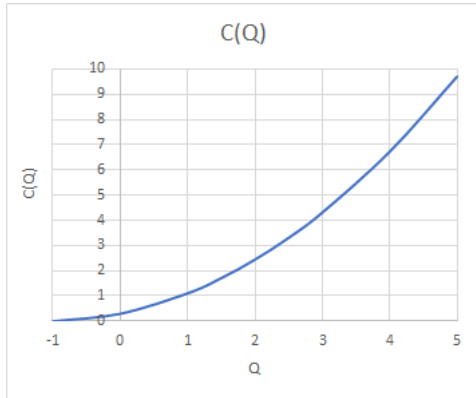
Хотя это и нетривиальная задача, кое-какие оценки для неё можно получить из самых общих соображений. Что мы сейчас и проделаем.

Введём функцию $C(Q)$. Она описывает минимально возможную стоимость устройства с эффективностью Q , выраженную в стоимостях аналогичного устройства той же массы при $Q = 1$. Что про неё известно?

1. $C(1) = 1$, по определению.
2. $C(Q)$ -- непрерывная функция, по крайней мере, пока разница в массе не измеряется штучными атомами. Интуитивно она кажется достаточно гладкой, чтобы иметь несколько первых производных. Думаю, можно допустить (как и с большинством физических функций), что она вообще аналитическая.
3. $C(Q)$ -- строго возрастающая функция. Чем выше качество Q , тем труднее сделать конструкцию, и тем она дороже. Т.е. $dC(Q)/dQ > 0$ по крайней мере для $Q > 0$.
4. При Q больше примерно 3-х $C(Q)$ начинает возрастать быстрее, чем линейно. Почему? Потому что мы видим, что людям дешевле сделать три грузовика на десять тонн с $Q = 1$, чем один на тридцать с $Q = 3$. Обобщая, пишем: $k \cdot C(1) < C(k)$ при $k \gg 3$ -- иными словами, $C(k)$ растёт быстрее, чем k , при $k \gg 3$.
5. Аналогично, поскольку десять самолётов с $Q = 0.1$ явно неэкономичнее одного с $Q = 1$ (ибо строят вторые, а не первые), то для $k \gg 3$ имеем: $k \cdot C(1/k) > C(1)$, или $C(1/k) > 1/k$.
6. Стоимость насоса от Шаттла намекает, что по крайней мере до $Q \sim 100$ величина $C(Q)$ нарастает ещё не как экспонента с существенным показателем. Иначе бы этот ТНА стоил не миллионы долларов, а эдак от $\$10^{20}$, и фиг бы мы вообще его сделали. Т.е. $C(100)$ -- это где-то 10^3 -- 10^8 , но никак не 10^{15} .
7. Чему равно $C(0)$? Это стоимость устройства, которое ещё может сдвинуть с места себя, но неспособно увезти никакой груз. Очевидно, такой "грузовик" дешевле полноценного. Но во сколько раз? История показывает, что скорее в разы, чем в десятки или сотни. От первого самолёта, способного перемещать только себя ($Q = 0$), до перевозки грузов по воздуху прошло каких-то лет 15. От первых бензиновых автомобилей до вполне приличных грузовиков с $Q = 1.5$ ([120] + [130]) ненамного больше. Если бы это развитие представляло собой неимоверную сложность, оно вряд ли завершилось бы так быстро. Следовательно, трудность изготовления и стоимость транспортного средства с $Q = 0$ не должна совсем уж радикально отличаться от одной при $Q = 1$. Отсюда ожидаем, что $C(0)$ -- это где-то 0.1 - 0.5.
8. Имеет ли эта функция смысл при отрицательных Q ? Вполне! Грузовик с $Q = -0.5$ -- это такой, который сдвинется с места, только если башенным краном "снять" с него половину его веса. А $Q = -1$ -- это повозка, развивающая нулевую тягу. Способная перевозить груз, только если взять её на буксир. То есть, вообще без двигателя. Очевидно, её стоимость если и не равна нулю, то очень мала. Поэтому положим $C(-1) \approx 0$.
9. А что такое $C(-2)$? Это стоимость устройства, которое нужно тянуть вверх не менее чем с удвоенным его весом, чтобы сдвинуть! Да, области $Q < -1$ -- это якоря, фундаменты, сваи, тормоза. Устройства, препятствующие движению. Там, конечно, совсем другая динамика и свои

законы, но по крайней мере мы видим, что $C(Q)$ не обрывается особенностью при $Q < -1$, и что в районе $Q = -1$ у неё минимум, а значит, хотя бы на небольшой окрестности этой точки $C(Q)$ должна вести себя как парабола.

Таким образом, эскизно $C(Q)$ выглядит как-то так:



Разложим $C(Q)$ в ряд Тэйлора в точке $Q = -1$:

$$C(Q) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n (Q + 1)^n}{n!}$$

Из свойства (8) следует, что $a_0 = 0$. Свойства (4), (5) и отчасти (9) намекают, что a_1 близко к нулю, или уж во всяком случае что его вклад не доминирует на диапазоне $0 \dots 3$.

А тогда получается, что первый ненулевой член в разложении $C(Q)$ -- параболический, и что при Q в районе единиц $C(Q)$ ведёт себя примерно как функция квадратичная или чуть более быстро возрастающая:

$$C(Q) \approx a_2 * (Q+1)^2 / 2 + O((Q+1)^3)$$

И из [1] следует, что $a_2 \approx 1/2$.

Наконец, поскольку по крайней мере до $Q \sim 100$ функция $C(Q)$ всё ещё не экспоненциальна (свойство (6)), то можно положить её там равной Q^p с показателем степени p где-то в районе $2 \dots 4$. Вряд ли больше.

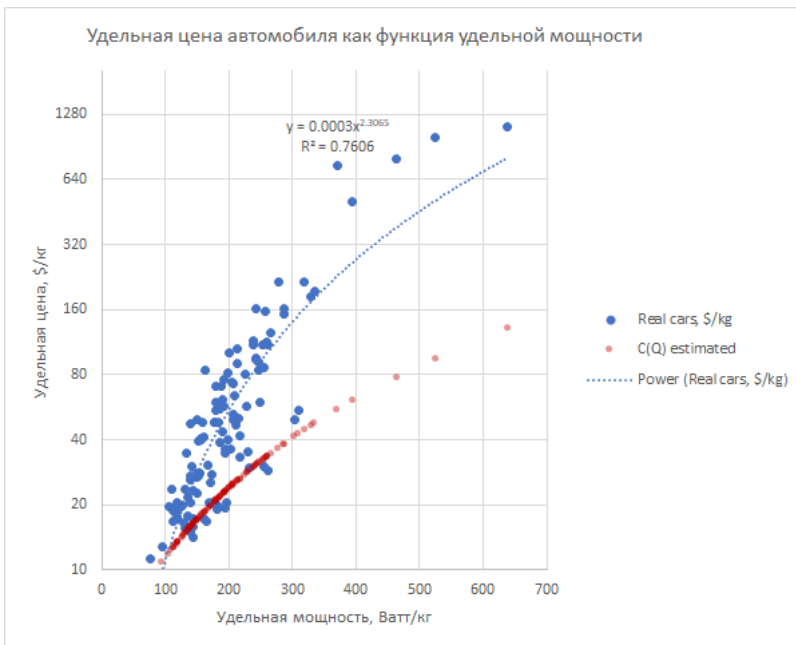
Вывод:

При фиксированной массе стоимость устройства $C(Q)$ возрастает не слабее, чем $(Q+1)^2/4$, но не быстрее, чем примерно $O(Q^4)$ [1]

Можно ли взглянуть на реальную зависимость $C(Q)$, чтобы проверить этот вывод? Трудно. Большинство механизмов, изготавливаемых человеком -- это разные массы, но фиксированные Q в районе единички. Нам же надо наоборот: примерно одинаковая масса, но разные Q . Сначала я надеялся на данные по авиационным двигателям... но работы [70][80] по их ценообразованию устроены очень смешно. Цены двигателей там засекречены, а опубликованы лишь формулы для предсказания и средние ошибки :)

К счастью, помощь пришла со стороны легковых автомобилей [150]. Именно у них, при примерно одинаковой массе, встречаются двигатели самых разных мощностей. И хотя мощность -- это ещё не перевозимый груз, но при некотором инженерном усилии он ей примерно пропорционален. Что позволяет прикинуть, близка ли наша формула к реальности.

Строим график:



[Источник: [150](#)]

Синие точки -- реальные легковые автомобили. В первом приближении их цена растёт как удельная мощность в степени 2.3. Красные точки -- цена, рассчитанная по формуле [1], исходя из предположения, что $Q = 1$ соответствует наиболее дешёвым за килограмм легковушкам в диапазоне \$20-30 тысяч. Видно, что формула действительно даёт неплохую оценку $C(Q)$ **снизу**, куда мы и целились.

При взгляде на массу этих вкусных точек возникает сильный соблазн: провести через них $C(Q)$ и, таким образом, исследовать зависимость непосредственно. Делать этого нельзя. Главным образом потому, что цена легковушки определяется не только её тяговыми характеристиками. Трудно вообразить себе машину за сто килобаксов, в которой нет самого хорошего кондиционера, самых удобных кресел и "платиновой пепельницы с родиевой окантовкой". А всё это стоит денег, не имеющих никакого отношения к нашей $C(Q)$. Однако вот нижняя "ветвь" автомобилей, проходящая почти в точности по рассчитанной $C(Q)$, выглядит интересно. Смею допустить, что это -- как раз машины без наворотов. Где "не шашечки, а чтобы ехать". Но дороже примерно \$100K за автомобиль таких уже нет.

Итак, стоимости устройств с высокими Q мы, хотя бы по порядку величины, прикидывать умеем. Зачем это было надо?

А вот зачем. Взглянем на первую ступень космического носителя. Ну вот хотя бы Протона-М^[110], для конкретности. Она -- почти полноценное транспортное средство, с двигателями, системой управления, приличным запасом прочности и сухой массой в 31 тонну. При этом на старте ракеты она тащит на своём горбу не только полезную нагрузку, но и всё топливо, все верхние ступени, и, конечно же, себя. В сумме -- 683 тонны. Плюс стартовая перегрузка, итого (эффективно) 1068 тонн нагрузки! **С точки зрения первой ступени** она работает в жутком режиме $Q = (1068/31) = 34.4!$ Это эквивалент 50 тонн груза, наваленного на легковушку.

И мы знаем, что стоимость устройства с высоким Q как минимум в $(Q+1)^2/4$ раз выше, чем чего-то аналогичного с $Q \approx 1$. Для "Протона" это составляет... 313 раз.

То есть, "Протон" должен обходиться раз в 300 дороже похожего устройства с $Q = 1$. И эта цифра мало зависит от прогресса и технологий. Ибо как только "британские учёные" изобретают супер-сплав, делающий ракету дешевле, тут же дешевет и наземные двигатели. Поэтому химическая ракета, даже многоразовая, будет всегда очень дорога. Как ни крути.

Хорошо. Допустим, в 300 раз. Но по сравнению всё-таки с **чем?** Неплохо бы сверить наши выкладки с какими-нибудь объективно существующими устройствами, для исключения возможности грубой ошибки.

К сожалению, тридцатонных ракет с $Q = 1$ нет. Но есть приблизительные аналоги, пригодные для сравнения.

- Самый первый -- карьерный самосвал. Да, не ракета. Но всё-таки тоже тепловой двигатель, не совсем тривиальная инженерия, и одно из самых дешёвых средств перевозки грузов. И если уж мы говорим об освоении космоса, то не грузовик ли должен быть прообразом бизнес-модели космического извозчика? Так что попробуем, хотя бы для общей прикидки. Вот 30-тонный Белаз-7540. Рыночная цена^[140] -- 3.7 миллиона рублей, т.е. \$62K. Для "Протона" это пересчитывается в стоимость первой ступени в районе \$19 миллионов. Википедия обозначает^[100] стоимость пуска как \$65 миллионов. Довольно близко, учитывая, что в эту сумму входит ещё много чего, кроме цены самой первой ступени.
- В [160](#) описана экспериментальная ракетная платформа на рельсах. Массой под 10 тонн, пять ступеней, разгоняется до 4 км/с. Цена 750 килобаксов. Судя по опубликованным картинкам и параметрам, работает это устройство где-то при $Q = 10$. Не единица, но всё-таки и не 34. Если отталкиваться от этих цифр, первая ступень "Протона" должна стоить где-то \$23 миллиона.
- Вообще, когда я пытаюсь представить себе ракету с $Q = 1$, перед мысленным взором возникает такая здоровенная болванка с маленькой выемкой, наполненной порохом. Порох выгорает и толкает болванку вперёд. Совсем чуток, сильно так не разгонишься. Я два

дня мусолил эту картину, пока не понял, что она мне напоминает. Это же... пневматический молот! Где газ расширяется и толкает болванку. Предельная бастардизация идеи реактивного двигателя, ещё сохраняющая какое-то родство. Что ж, ищем. Ага, вот [\[170\]](#) пневматический молот Stanko M212. Вес болванки 2 тонны, всей конструкции -- 58.3 тонн. Q системы, таким образом, составляет скромненькие 0.034. Продаётся за 40 тысяч евро. Если экстраполировать стоимость этой шутки на $Q = 34.4$ по формуле [1], то получится... 47 миллионов евро. Или 24 миллиона в пропорции за 30 тонн.

Вроде, мы не совсем уж оторваны от реальности.

Подведём промежуточные итоги. Поскольку ракеты, даже многоэтажные, стоят на 2-3 порядка дороже грузовиков, то и любое космическое поселение из наземных материалов тоже обойдётся в 100-1000 раз дороже наземного аналога. Это очень высокий барьер на освоение.

Ракеты же дороги потому, что они при очень лёгкой конструкции вынуждены выдерживать очень высокие нагрузки, работая при нездорово высоких Q . Но почему ракеты тяжёлые? Ответ (который несколько глубже, чем формула Циолковского) мы рассмотрим во второй части.

Важное замечание. В вышеприведённом тексте имеется серьёзная неочевидная неточность. Её заметили несколько человек. Но благодарен я пользователю [didkovskyi](#). Он не стал размахивать соевой на глобусе, обвинять меня в намеренной подгонке данных, и пытаться перечислить все шершавости текста (а куда же без них?). Он сфокусировался на главном, задав один-единственный простой [вопрос](#):

Не совсем понял, почему массу топлива в ракете отнесли к полезной нагрузке.

И вот тут я, попытавшись сформулировать ответ, разглядел, наконец, эту неоднозначность в незамутнённом виде.

Есть два разных Q . И они **очень** похожи.

Первое, Q_1 , характеризует экономическую эффективность системы. Оно равно массе груза к сухой массе ТС. **Без** топлива. Почему без? Потому что именно в таком рассмотрении вырисовывается сильная закономерность $Q = 1$. Со страшной силой. Вероятность случайного совпадения — на уровне 10^{-300} . Можно выкинуть конвейерную ленту, подозрительные электрокары, ракеты и ещё половину точек — всё равно p -value остаётся астрономически ничтожным. Спрашивать, почему мы смотрим именно без топлива — это все равно что требовать у Ома, чтобы он не ток от напряжения мерял, а что-то другое. Именно там возникает закономерность. Видимо, «так устроена природа». Впрочем, очень хорошее, на мой взгляд, объяснение феномену [предложил santa324](#).

И есть другое Q , назовем его Q_2 . Оно характеризует способность системы выдерживать механическую нагрузку. Равно весу груза плюс топлива, деленным на mg , где m — масса сухой конструкции.

Для подавляющего большинства транспортных средств $Q_1 \approx Q_2 \approx 1$. Именно это сходство не позволило ни мне, ни десятку человек, которых я просил вычитать и «разбомбить» статью перед публикацией, заметить неоднозначность. И потребовались тысячи читателей Хабра, чтобы обратить на неё внимание.

Существенная разница возникает именно у ракет. Из-за массы топлива. Так, у первой ступени Протона Q_1 — это масса всех заправленных вышестоящих ступеней плюс ПН, к сухой массе ступени. Где-то 7.7. А вот Q_2 действительно зашкаливает за 34.

И здесь встаёт вопрос: так к какому же Q применимы полученные формулы стоимости?

Я утверждаю, что к Q_2 . Именно им определяется способность системы держать нагрузки, а значит, и инженерная сложность. Почему? Проведите простой мысленный эксперимент. Вы — конструктор первой ступени Протона. Есть два варианта нагрузки, на которую её нужно рассчитывать:

- Q_1 , нагрузка 240 тонн (только верхние ступени).
- Q_2 , нагрузка 1068 тонн (вес верхних ступеней и топлива, да с учётом перегрузки)

Очевидно, что если выбрать Q_1 , то ракета не то что никуда не улетит, а просто порвётся ещё на этапе заправки. Значит, конструировать её надо под значительно большую нагрузку Q_2 . С соответствующими инженерными трудностями и более высокой стоимостью.

Суммируем:

- Q_1 характеризует экономическую эффективность транспортного средства, Q_2 — инженерную стоимость.
- Для большинства человеческих ТС $Q_1 \approx Q_2 \approx 1$.
- Однако у первых ступеней ракет $Q_1 \approx 3-10$, а Q_2 — несколько десятков. Последним и определяется (в значительной степени) их высокая стоимость.

Про данные.

Желающие самостоятельно всё проанализировать могут найти все цифры (вместе с источниками) [здесь](#). При работе с ними следует учесть следующее.

- Рассматривались только грузовые транспортные средства. Пассажирская Tesla с вместимостью багажника в 70 кг -- не грузовик. Грузовые фургоны тоже (почти) исключены -- у них средства защиты груза вносят существенные искажения. Почему? Потому что именно на таком подмножестве вырисовывается закономерность. И ещё раз, это подгонка описания под данные, а не наоборот.

2. С советскими грузовиками работать было одно удовольствие. Вот вес, вот допустимая нагрузка, всё чётко. С современными, особенно американскими -- беда. Мало кто публикует их максимальную грузоподъёмность. Вместо этого есть **законы**, разрешающие ту или иную нагрузку для каждого типа бизнеса и дорог. Плюс приписка к грузовику: "удовлетворяет стандарту № такой-то, § такой-то". Полная, разгромная победа бюрократии над физической реальностью. В тех случаях, когда грузоподъёмность всё-таки публикуется, она сплошь и рядом взята ~~от балды~~ из маркетинговых соображений. Строишь график -- а там явная "ёлочка", пардон, линейка продуктов. По этой причине, увы, данные **современных** грузовиков более зашумлены (± 0.60), нежели старых (± 0.23). Положение отчасти спасли Китай, Россия и Индия: у них ТТХ грузовиков по-прежнему легкодоступны.

3. Самые лёгкие электрические кары и мотоциклы весят зачастую по 30-70 кг, перевоза при этом по 200-400 кг груза. На первый взгляд, это выглядит как **Q** в районе десятки. Но я подумал и кое-что осознал. Все эти транспортные средства **не ездят** без человека. Более того, человек в них выполняет ещё и структурно-силовую и балансирующую роль. Он в них -- не полезная нагрузка, без которой можно и уехать, а неотъемлемая запчасть. Поэтому и массу их надо считать с водителем (+80 кг). А это уже 100-150 кг. Аналогичная поправка вносилась в характеристики конных экипажей, с массой лошади принятой за 500 кг.

4. Массу поезда я считал с массой подстилающих его рельсов. Ибо, в отличие от прочих транспортных средств, перемещаться поезд может только по рельсам, а они весят существенно и держат транспортную нагрузку. Как гусеницы у бульдозера. Только не носимые с собой. При этом на сами рельсы, вагоны и электровозы существует куча запутанных спецификаций, в которых я не факт, что правильно разобрался. Судя по комментариям, включение рельсов народ сильно удивило. Разочарую: если их исключить, запредельных **Q** для поездов не получится. Ну будет там тройка вместо 2.3, мало что от этого изменится.

5. Атомный грузовой ледокол в мире один: российский Севморпуть^[600], так что и точка в этой группе лишь одна.

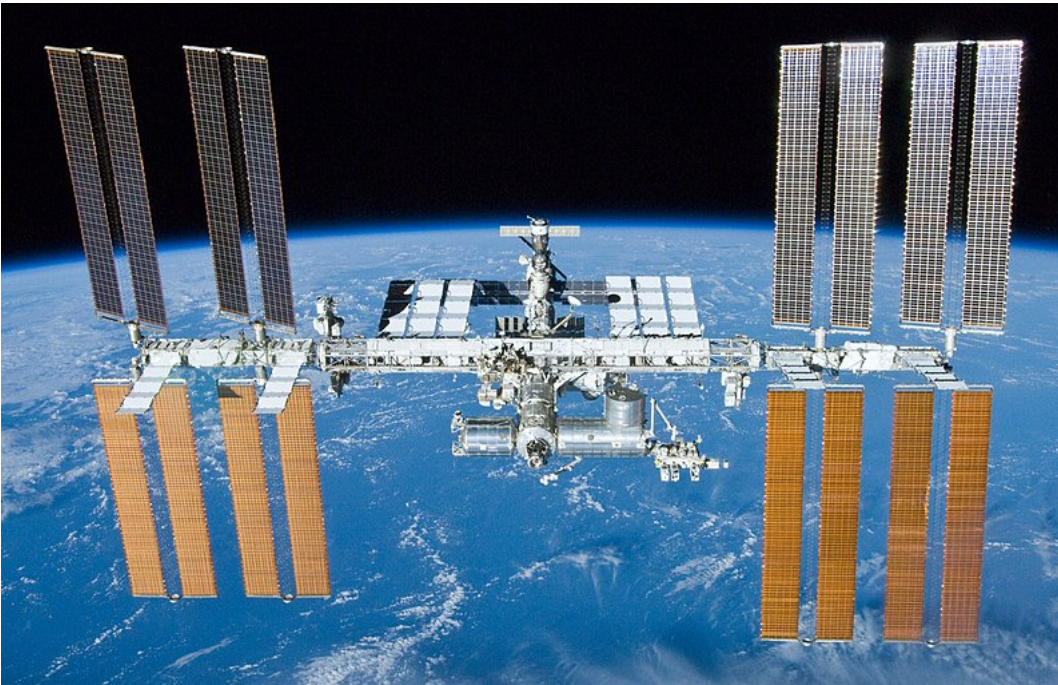
6. С грузовыми мореходными судами тоже не всё просто. Для большинства из них не публикуется ни максимальная масса груза, ни пустая масса конструкции. Для второго, правда, есть всё-таки термин: LWT -- Light Weight Tonnage, и его значения изредка встречается на корабельных аукционах (типа ^[610] и ^[620]). Долгим ручным вычитыванием этих сайтов я надёргал цифр по LWT, но как быть с перевозимым грузом? Вместо него обычно используется величина DWT (Deadweight Tonnage), представляющая собой полный максимально возможный вес корабля. В который входят не только вес груза, но и конструкции, топлива, вспомогательных жидкостей, и ещё каких-то мелочей. Пошарившись по разным сайтам, я установил, что на практике предельный вес груза обычно составляет 85% от (DWT - LWT), с разбросом в 65-90%. Этим пришлось и удовлетвориться. Так что грузоподъёмность считалась как $G = 0.85 * (DWT - LWT)$. Что, возможно, внесло погрешность до 30%.

7. По космическим носителям я опирался в основном на ^[110]. Там лежит разбивка многих ракет по ступеням и их массам. К сожалению, иногда с пометкой, что масса ступени включает остатки несгоревшего топлива, которые толком неизвестны. По этой причине величина **Q** для ракет, возможно, занижена процентов на 10.

8. Были ли транспортные средства, в эту картину не включённые? Конечно. Во-первых, **негрузовые**. Танки. Пассажирские автомобили, круизные пароходы. У них **Q** существенно меньше единицы. С последними всё понятно: их цель -- не груз увезти, а людей, да ещё с комфортом. Вес средств комфорта портит им картину. Во-вторых, сюда не вписываются танкеры, у которых **Q** нередко достигает 3-8 единиц. Но у танкеров особенный и очень "удобный" груз, допускающий равномерное распределение нагрузки по корпусу и удержание её не столько собственной прочностью, сколько внешним давлением моря. На суше аналогом этого был бы грузовик с "костылями", но таких нет, сравнивать не с чем, а потому танкеры я на графике не указал. Народ на эти танкеры накинудся, не понимая, что внешнее давление моря действительно позволяет сделать корпус менее прочным и более легким, в отличие от, скажем, дирижаблей или грузовиков.

Часть 2/5. Very Heavy Fuel.

Перед вами -- Международная Космическая Станция. Массой в 420 тонн и стоимостью^[20] в \$150 миллиардов:



Её кинетическая энергия, старое доброе $E = mv^2/2$, составляет $1.3 \cdot 10^{13}$ джоулей. Добавив потенциальную энергию на высоте 400 километров, получим $1.4 \cdot 10^{13}$ Дж.

Сколько бензина надо сжечь, чтобы получить эту энергию? Оказывается, не так уж и много. 350 тонн всего. Это примерно^[200] однодневный энергетический бюджет Улан-Удэ.

Как же так получается, что далеко не самый богатый город мира за один-единственный день распоряжается энергией, достаточной для разгона МКС до орбитальной скорости, однако же станция у нас на весь мир одна, и стоит неприлично бешеных денег?

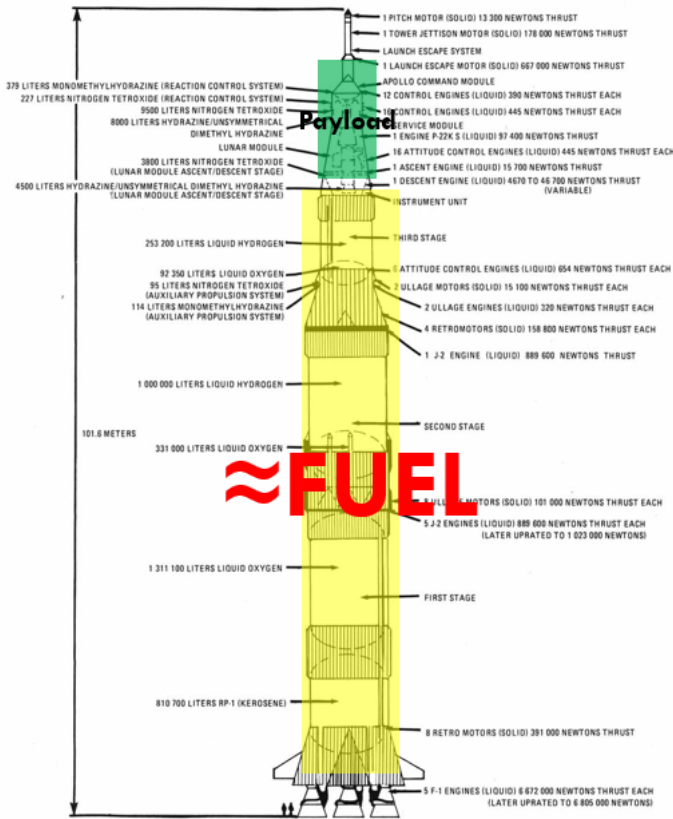
Ответ кроется в очевиден из анатомии ракеты-носителя.

Носитель, как минимум, обязан включать в себя:

1. Полезную нагрузку. Иначе зачем он вообще нужен?
2. Хотя бы один двигатель.
3. Корпус, всё это соединяющий.
4. И, разумеется, топливо. Как рабочее тело и (в большинстве случаев) как источник энергии.

И вот в последнем-то пункте и коренится проблема. Чтобы поднять и утащить некий минимум топлива, нужно... правильно, дополнительное топливо! На подъём которого нужно тоже топливо! И эта накрутка продолжается долго. Она, конечно, сходится, иначе бы мы вообще никуда не летали. Но по результатам сходимости современная ракета, даже многоступенчатая, даже качественно спроектированная и выполненная, по массе состоит преимущественно из этого самого топлива.

Ну вот хрестоматийный пример, Saturn V -- не самая новая, но одна из самых эффективных ракет в истории^[30]:



[Original image from NASA History [40]]

Стартовая масса -- 2970 тонн. Из них где-то 2670 -- топливо. Из которых 2160 выгорают меньше чем за три минуты всей лунной экспедиции. При том, что кинетическая энергия полезной нагрузки на орбите "стоит" всего-то тонн 100 горячего.

Получается, главная трудность выхода на орбиту -- это не недостаток энергии. Её землянам с избытком хватает на кинетическую энергию не то что станций, а хоть бы и круизных пароходов на орбите. Проблема в другом: наше топливо слишком тяжелое. Слишком много его надо в килограммах, чтобы собрать требуемое на полёт количество энергии. Отчего большая часть топлива, залитого в ракету, уходит на перевозку его же. Собственно, формула Циолковского, увязывающая стартовую **M** и финишную массу ракеты **m** с набранной скоростью **V** и скоростью истечения выхлопа двигателя **u**, говорит нам о том же:

$$M/m = e^{V/u} \quad [2]$$

На первый взгляд не совсем очевидно, при чём тут содержание энергии на килограмм? Но всё просто. Оно "сидит" в **u**, в скорости истечения. Для химического топлива она ограничена величиной (и в первом приближении равна ей) $u = \sqrt{2q}$, где **q** -- удельная теплота сгорания. Которая и есть содержание энергии на килограмм. И когда это **q** "не дотягивает", отношение масс на старте и финише оказывается экспоненциально громадным:

$$M/m = e^{V/\sqrt{2q}} \quad [3]$$

Или

$$V = \ln(M/m) * \sqrt{2q} \quad [3a]$$

Несколько замечаний, для зануд и для ясности.

1. Да, я в курсе, что есть более точные выражения для скорости истечения, чем $u = \sqrt{2q}$. Когда я сдавал по ним зачёт, Горбачёв "сдавал" СССР. Но эти формулы сложноваты, распугивают читателей, и учитывают эффекты, здесь неважные. $u = \sqrt{2q}$, хоть и завышает ответ на 10-30%, адекватно описывает интересующую нас зависимость. И да, есть такое понятие, как удельный импульс, но в данной конкретной статье скоростью истечения пользоваться удобнее.

2. В принципе, ничто не запрещает даже химической ракете получить скорость истечения **u** выше, чем $\sqrt{2q}$. Как? Ну, скажем, сжигать топливо не в сопле, а в генераторе, вырабатывая электрическую энергию. Затем этой энергией разгонять долю **x** выхлопа ($0 < x \leq 1$) до очень высоких скоростей. Допустим, плазменным электрическим реактивным двигателем [230]. А остатки выхлопа тупо сбрасывать с нулевой скоростью. Для простоты положим, что все преобразования происходят без потерь энергии, со 100%-й эффективностью. Разгонится ли такая ракета до большей скорости **V** при фиксированном отношении масс **M/m** (т.е., будет ли она эффективней)?

Ответ отрицательный. Легко решить уравнения, описывающие движение такой ракеты, и получить:

$$V = \ln(M/m) * \sqrt{2qx}$$

Т.е. её конечная скорость составит лишь \sqrt{x} от набранной "обычной" ракетой с непосредственным сжиганием топлива (ср. с [3а]). И эта скорость всё равно жёстко завязана на величину q .

3. Что если ракета работает не на топливе, а на батарееке? Ну вот пусть на борту есть отдельно рабочее тело массы m_f и отдельно -- батарейка с запасом энергии E и массой m_b .

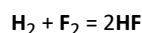
Первое, что здесь надо понять -- это что батарейка должна состоять из множества небольших "модулей", сбрасываемых по мере отработки. Ибо в противном случае мы будем тащить с собой "мёртвый" груз пустых батарей. Но если так, то концептуально это ничем не отличается от обычного топлива на борту с полным запасом энергии E и массой $m_f + m_b$. И если $q = E/(m_f + m_b)$ такой системы ниже, чем у обычной химической ракеты, то и улетит она не лучше.

4. А как же электрические ракетные двигатели^[225]? Они ведь дают скорости истечения в десятки и сотни километров в секунду, и на них совершались успешные межпланетные манёвры при весьма скромных отношениях M/m . Как так? Дело в том, что ЭРД -- незамкнутые системы. Рабочее тело (ртуть, ксенон и т.п.) они везут с собой. А вот энергию -- нет. Энергия поступает с солнечных батарей. Если бы вместо этого они несли с собой обычные батарейки с содержанием энергии на массу q , то и эффективность у них была бы не выше, по формуле [3а].

Итак, ракеты дорогие потому, что их крайне лёгкая "сухая" конструкция вынуждена выдерживать крайне тяжёлую нагрузку, в основном топлива (да ещё и быстро "прокачивать" её через ТНА). А нагрузка велика потому, что наше топливо слишком тяжело. Очень уж мало в нём помещается джоулей на килограмм.

Давайте теперь поймём причины этого ограничения.

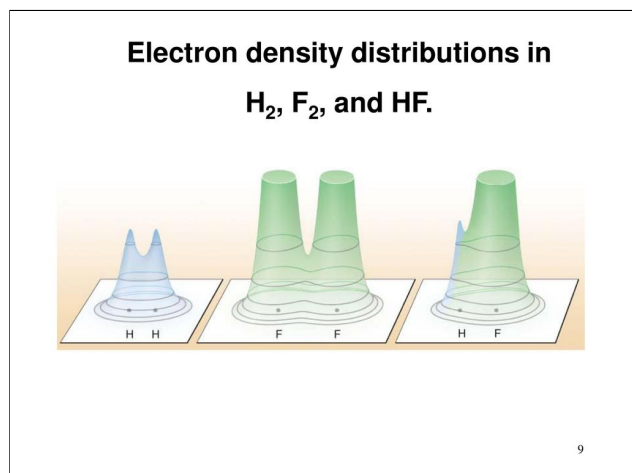
Для чего взглянём поближе на реакцию горения водорода во фторе, как одну из самых простых. В ней пары "водород-водород" и "фтор-фтор" обмениваются партнёрами, создавая две пары "водород-фтор":



Откуда берётся энергия?

У молекулы водорода есть два атома. У атомов есть электроны. Они "размазаны" вокруг атома в виде эдакого облака, и связаны с ядром главным образом электростатическим притяжением. Электроны бывают внешние, валентные, и (кроме водорода) внутренние, в химических реакциях не участвующие.

После реакции водород со фтором меняются местами. Электрические облака валентных электронов перераспределяются и слегка меняют форму. Как-то примерно так:



[Image credit ^[295]]

Потенциальная энергия связи электронов с атомами в новых облаках оказывается другой. В данном случае (эта энергия отрицательна) она теперь меньше, чем у H_2 и F_2 по отдельности. Куда пошла разница? В кинетическую энергию молекулы, колебания её атомов, электромагнитное излучение. Всё это в итоге превратилось в тепло. Которое расширило газ и дало тягу.

И здесь **критически** важен вот какой момент. В химических реакциях участвуют лишь внешние, валентные электроны. Распределение плотности прочих электронов, равно как и напряжённость электрического поля "в глубине" атома, остаются практически неизменными. В химических реакциях атомы взаимодействуют друг с другом как бы через "посредников", какими выступают валентные электроны:



Теперь, внимание, вопрос: какова предельно возможная энергия, которая может выделиться при подобной "перестановке"? Очевидно, она не может превышать суммы энергий связи внешних электронов с атомами (в конечном и начальном продукте). Но эти энергии связи нам хорошо известны^[285]. В расчёте на один атом они составляют 1.5 - 25 **электронвольт** (эВ -- единица энергии, удобная для измерения химических и молекулярных энергий. 1 эВ = $1.6 \cdot 10^{-19}$ Джоуля), и выражаются в долях постоянной Ридберга -- величины фундаментальной, конструируемой из базовых констант нашей Вселенной:

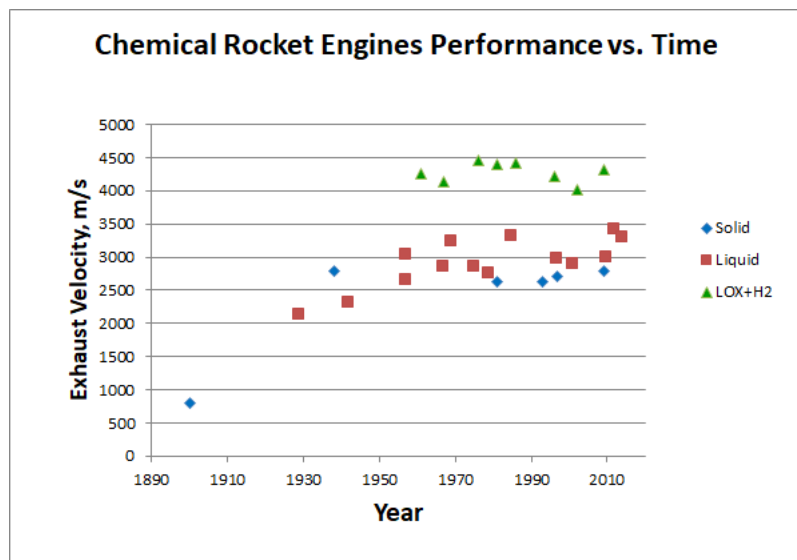
$$Ry \text{ (в Гауссовой системе)} = m_e e^4 / 2\hbar^2 = 13.6 \text{ эВ} \text{ [300]}$$

При этом и 25, и 13.6 эВ -- недостижимы. Ибо в типичных реакциях высвобождается далеко не вся энергия связи, а только её разница между двумя конфигурациями, и поэтому практический потолок энерговыделения химии составляет 3-4 эВ на атом. В пересчёте на типичный килограмм горючего + окислителя это эквивалентно 20-30 МДж выделившейся энергии. Вот этой величиной и задаётся максимальная скорость истечения газа химического реактивного двигателя $u = v(2q) = v(2 \cdot 2.5 \cdot 10^7) \approx 7000$ м/с. Недостижимая, конечно, ибо не учитывает потерь на внутренние степени свободы молекул, излучение, ненаправленное тепловое движение и т.д.

Может показаться, что табличные теплоты сгорания^[240] (скажем, 120 МДж/кг для водорода) выписанной выше цифре противоречат. Но дело в том, что эти теплоты обычно указываются на килограмм **горючего**, без учёта потребного для его сгорания окислителя. Ракета же везёт с собой оба компонента, и если пересчитать выделяющуюся энергию на килограмм **смеси** (при сбалансированном сгорании), то вырисовывается совсем другая картина^{[240][250][260]}:

Топливо + окислитель	Уравнение реакции	Теплота сгорания на килограмм топлива, МДж/кг	Но на 1 кг топлива требуется окислителя, кг...	Теплота сгорания на килограмм смеси, МДж/кг	Средняя выделяющаяся энергия на атом смеси, эВ
Водород + кислород	$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	120	8	13.3	0.83
Керосин + кислород	$2C_{12}H_{26} + 37O_2 = 24CO_2 + 26H_2O$	43	3.5	9.6	1.02
Уголь + кислород	$C + O_2 = CO_2$	33	2.7	9.0	1.38
Литий + кислород	$4Li + O_2 = 2Li_2O$	43.5	1.2	20.2	2.10
Бор + кислород	$2B + 1.5O_2 = B_2O_3$	57.2	2.2	17.8	2.58
Магний + кислород	$2Mg + O_2 = 2MgO$	25.1	0.7	15.1	3.18
Бериллий + кислород (согласно Википедии, самая высокоэнергетичная реакция на килограмм смеси)	$2Be + O_2 = 2BeO$	66.6	1.8	24.0	3.12
Литий + фтор	$2Li + F_2 = 2LiF$	88.8	2.7	23.7	3.21
Бериллий + фтор (реакция хоть и злее, чем с кислородом, но фтора по массе больше требует -- и проигрывает!)	$Be + F_2 = BeF_2$	114	4.2	21.9	3.57
Дицианоацетилен + озон (рекордсмен температуры)	$C_4N_2 + (4/3)O_3 =$	16.2	0.8	8.8	1.28

Как видим, даже самые энергоёмкие, пусть и непригодные для практического использования, виды топлива дают лишь 24 МДж/кг тепла при сгорании. И мы в этот предел упёрлись едва ли не с начала космонавтики, что показывает график скорости истечения химических двигателей в зависимости от года их создания:



[Ранние двигатели по данным [\[310\]](#), [\[320\]](#), [\[330\]](#), поздние -- Википедия поштучно. Сборка данных [здесь](#)]

Похоже, потенциал химического топлива давно уже выработан? Может, стоит хранить энергию в другом виде?

Часть 3/5. Цивилизация пружин.

Итак, какие же ещё есть способы хранения энергии, помимо химического топлива? Пусть даже не для ракет, а вообще?

Начнём с электрической батареи. Вот хотя бы литиево-ионной. Откуда в ней берётся энергия?

Всё просто, там идёт [\[210\]](#) электрохимическая реакция:



Идёт налево -- ~~песнь за~~ заряжается. Направо -- разряжается.

Вы, конечно, уже догадались. Поскольку предел энергоёмкости химической реакции нам известен ($\approx 20-30$ МДж/кг), то такова же и максимальная плотность энергии для **любой** батарейки/аккумулятора. Хотя свинцового, хоть никель-кадмиевого, хоть серно-натриевого.

Простого взгляда на характеристики разных типов батарей в Википедии [\[340\]](#) достаточно, чтобы подтвердить эту догадку. И ещё увидеть: даже лучшие батареи по энергосодержанию (1-3 МДж/кг) до теоретического предела пока не дотягивают целый порядок. Батарейка не бьёт бензин и никогда его не побьёт -- но развиваться ей ещё есть куда.

Окей, давайте попробуем что-нибудь радикально другое. Совсем на батарейку не похожее. Ну вот хотя бы пружину. Как в ней запасается энергия?

К материалу прикладывается нагрузка. Нагрузка смещает атомы относительно друг друга. Из-за смещения электрические облака внешних, валентных электронов перераспределяются и слегка меняют форму... Стоп! "Кажется.... сегодня я это уже говорил..."



[Image Credit: фильм День выборов [\[630\]](#)]

Да, именно так. Энергия упругости складывается преимущественно в электрическом поле внешних электронов. А значит, и предел у неё тот же самый: $\approx 20\text{-}30$ МДж/кг, или 3-4 эВ на атом, соответствующих энергии связи либо валентных электронов с атомом (в ковалентных и ионных решётках), либо атома с электронной "жидкостью" распределённых электронов (в металле, где на самом деле всё сложнее и я срезал тут пару углов, но на ответ это радикально не повлияло).

Как проверить этот вывод? С топливами легко, теплоты сгорания есть в любом справочнике. А какой физический параметр для материала пружины является мерой предельной запасаемой энергии?

Чуток формул.

Рассмотрим маленький параллелепипед материала внутри пружины. Длина a , площадь S . Объём $V = aS$. Его растягивают. Делать это можно, пока давление (на растяжение) внутри бруска не достигнет предела прочности, обозначаемого буквой σ ; попытка дальнейшего растяжения приведёт к необратимой деформации без запасания энергии. Сколько энергии в этом бруске? Работа $A = \int F \cdot dx$ от нуля до $\epsilon \cdot a$, где ϵ -- относительное удлинение, при котором деформация ещё обратима. За исключением резиноподобных материалов (где работает другой механизм) $\epsilon \ll 1$ всегда -- ибо атомы не могут поменять взаимное расположение на расстояния, сопоставимые с исходными, без радикальной перестройки всей решётки. Следовательно, удлинение мало, а силу сопротивления можно полагать линейно растущей с удлинением: $F \approx (x/a\epsilon) \cdot S \cdot \sigma$. Интегрируем, получаем работу $A = x^2 \cdot S \cdot \sigma / 2a\epsilon$, подстановка от 0 до $a\epsilon$, итого $A = Sa\sigma\epsilon / 2 = \sigma V\epsilon / 2$. А сколько энергии получается на единицу массы? Надо разделить A на $m = \rho V$. Будет $w = \epsilon\sigma / 2\rho$.

Величину ϵ можно оценить как $\epsilon \approx \sigma/E$, где E -- модуль Юнга для вещества. Но мы поступим проще. Поскольку для абсолютно подавляющего большинства конструкционных материалов ϵ меньше [\[358\]](#) (и даже существенно меньше) единицы, мы просто загрузим оценку, записав $w < \sigma / 2\rho$. Как выяснится в дальнейшем, этой точности вполне хватит для понимания картины.

Ответ: предельная плотность упругой энергии на килограмм не превышает $w \approx \sigma / 2\rho$, где σ -- предельное давление, выдерживаемое материалом без необратимой деформации, а ρ -- его плотность. И если наше понимание на молекулярном уровне хотя бы приблизительно верно, то это отношение должно быть не больше $\approx 20\text{-}30$ МДж/кг. Смотрим прочности [\[350\]](#)[\[355\]](#) материалов, сравниваем:

Материал	Предельная нагрузка на растяжение σ , ГПа (yield strength)	Плотность, кг/м ³	$w = \sigma / 2\rho$, МДж на килограмм
Нержавеющая сталь	0.505	8000	0.031
Титановый сплав Beta C	1.25	4810	0.13
Бериллий	0.345	1840	0.19
Мартенситно-старяющая сталь [2800 Maraging steel]	2.617	8000	0.33
Алмаз	1.6	2800	0.57
Кевлар	3.62	2514	1.25
Углеродное волокно Toray T1100G	7.0	1790	2.96

Всё так. Более того, большинство конструкционных материалов не дотягивают до предела 1-3 порядка. Ибо у реальных веществ в кристаллических решётках всегда есть многочисленные дефекты, не позволяющие им достигать даже той прочности, на которую в принципе способны составляющие их атомы и молекулы. А реальные пружины, в свою очередь, не дотягивают даже и до предела по дефектам -- потому что "плывут" уже при очень небольших относительных деформациях.

А графен [\[95\]](#), спросите вы? Как же графен, с заявленными характеристиками [\[355\]](#) в 65 МДж/кг? И всякие "колоссальные нанотрубки"? Мы про них мы в четвёртой части поговорим. Пока же ограничимся утверждением, что за парой очень специфических и штучных исключений, предел <http://tung-sten.no-ip.com/Texts/Popsci/CivilizationOfSprings/Text.htm>

упругой энергоёмкости твёрдой материи действительно не превышает ≈ 30 МДж/кг.

"Но если это предел, то какой-то странный" -- скажут некоторые -- "почему некоторые материалы его всё-таки превышают? И какова величина этого предела в теории?"

Это предел в том же смысле, в каком мы говорим о пределе человеческого роста. 99.9% индивидов ограничены ростом в 199 см. Однако штучный рекорд составляет 272 см. Теоретическое же ограничение, исходя из прочности человеческого тела — метров 5. Хотя такого никто не видел и вряд ли увидит, и на практике при строительстве домов не применяется.

Так же и Пружинный Предел. Для абсолютно подавляющего большинства обычной материи он составляет 20-30 МДж/кг. Единичные рекордсмены типа графена достигают 65 МДж/кг. И мы очень в них заинтересованы. Теоретически же максимальное значение, как я полагаю, может реализовываться каких-нибудь нанорешётках из бора. Которые, правда, никто не видел и не факт, что увидит.

Почему теоретический? Потому что за ним лежит фундаментальный энергозапас межатомной связи: 4 эВ на атом. Но атомы по весу разные и эффективное количество связей тоже непостоянно. Поэтому на килограмм разные цифры получаться могут, и не совсем очевидно, какая же конфигурация даст именно максимум.

Но, может, проблема с пружиной в том, что её нельзя сжимать выше предела прочности материала? Однако это можно делать с газами! Что если хранить энергию в сжатом газе?

Итак, дано: сферический баллон радиуса r из металла с прочностью σ . В него закачан газ под давлением p . Какой толщины должна быть стенка, чтобы баллон не разорвало? Простейший подсчёт показывает, что эта толщина $\delta = (r/2) * (p/\sigma)$. Сколько весит такой баллон? $m = \rho V = \rho * 4\pi r^2 \delta = 2\pi r^3 p / \sigma$. Сколько в нём запасено энергии? $E = pV = 4\pi r^3 p / 3$. Массой самого газа пренебрежём. Потерями на расширение тоже. Сколько будет джоулей на килограмм? Делим E на массу баллона m , получаем...

$$w = 2\sigma/3\rho$$

Та же пружина. С тем же Пружинным Пределом, **не зависящим от давления в баллоне**. Конечно, за счёт хитрой геометрии или толстых стенок из этого, наверное, можно выжать ещё пару раз. Но уж никак не пару сотен...

Маховик? Его предел определяется способностью материала сопротивляться нагрузке, создаваемой ~~центробежной силой~~ центростремительным ускорением. Несложно показать, что и здесь плотность энергии составит ^[640] те же σ/ρ с точностью до пары раз за счёт геометрии. Правда, на практике у маховика этот предел **не зависит** от относительного удлинения перед разрушением, и, следовательно, (почти) полностью достигается, в отличие от пружины.

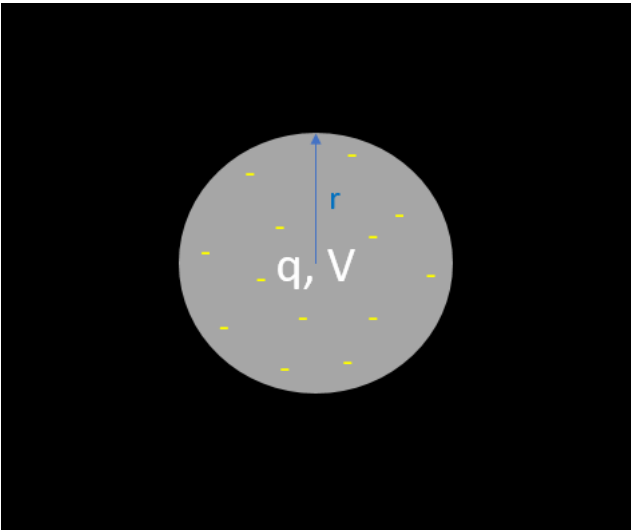
Отбросим механику. Есть же более современное электричество, давайте хранить энергию в нём?

Допустим, вакуумный конденсатор. Простейший: две пластины, электрическое поле между ними. Как известно ^[360, стр. 106], каждый кубосантиметр электрического поля хранит $E^2/8\pi$ единиц энергии (в СГС, электричество я привык считать в ней). Сколько это будет на килограмм? А килограммы возникают неизбежно, поскольку конденсатору нужна прочность. Пластины-то друг к другу притягиваются. Притягиваются так, как будто бы испытывают отрицательное давление электрического поля. Которое равно ^[360] тем же самым $E^2/8\pi$! То есть, эта задача эквивалентна задаче о баллоне с газом с отрицательным давлением, удерживаемым от разрушения прочностью стенок. И мы эту задачу только что решили. Ответ известен: всё те же несчастные σ/ρ плюс-минус пару раз.

А если конденсатор не вакуумный? Если заполнить диэлектриком? Он же примет на себя часть нагрузки. И увеличит объёмную плотность энергии в ϵ раз, ибо в диэлектрике она равна ^[650] $\epsilon E^2/8\pi = \epsilon E^2/8\pi$. Казалось бы, вот оно, счастье? Но увы, сжимающее давление на конденсатор тоже возрастает в ϵ раз при фиксированном внутреннем E , и выходит так на эдак. А ведь мы ещё пренебрегли электрическим пробоем. Вероятность которого нарастает катастрофически, как только поле E становится сопоставимым с межатомными полями, создаваемыми внешними валентными электронами. То есть, и здесь всё упирается в Пружинный Предел.

Тогда как насчёт супер-конденсаторов ^[220], с сумасшедшими ёмкостями до сотен фарад? Увы, тоже никак. По принципу действия они разделяются на два класса. Электрохимические -- это фактически окислительно-восстановительные батареи, запасающие энергию в химической форме, просто очень быстро. И электростатические, больше похожие на конденсаторы в привычном понимании, только с очень тонким зазором между "электродами", в несколько молекул шириной. У первых запас энергии, очевидно, упирается в химию. У вторых -- в величину пробойного электрического поля. Которое не может существенно превышать силой межатомные электрические поля, удерживающие в целостности материю. А это те же единицы эВ на размер атома. Таким образом, и супер-конденсаторы ограничены в хранении энергии величиной ≈ 30 МДж/кг. Википедия свидетельствует ^[223]: ни одно из этих устройств даже близко не подходит по плотности энергии к этому пределу. И, исходя из нашего понимания, и не подойдёт.

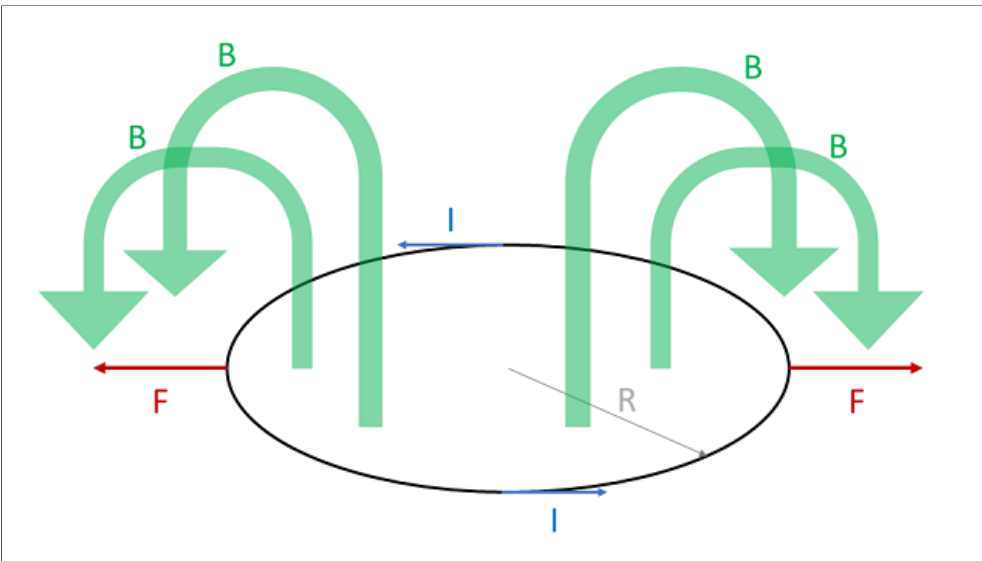
В последней попытке перепрыгнуть этот предел электростатикой давайте взглянём на сферический конденсатор в вакууме:



Берём идеально гладкую металлическую сферу радиуса r . Охлаждаем её до (почти) абсолютного нуля. Увозим далеко-далеко в бесконечно глубокий вакуум. И обстреливаем электронным пучком, очень издалека. Электроны, попадая на сферу, придадут ей заряд q и (как можно подсчитать) полную энергию $W = q^2/2r$. Вроде, не зависящую от массы сферы. Оно???

Увы, подобный конденсатор можно заряжать не до бесконечности. А лишь до тех пор, пока созданное им электрическое поле у поверхности не станет сопоставимо по напряжённости с электрическими полями между атомами. Если приблизиться к этой величине отрицательным зарядом, начнётся дикая электронная эмиссия ([390, стр 13], [400]) и заряд улетит в окружающий вакуум за пару минут. Если положительным -- потеряет прочность кристаллическая решётка конденсатора, вещество "испарится" или попросту рассыпется. ~~Летко~~ у меня ушёл день, чтобы подсчитать, что в первом случае плотность энергии на килограмм составит лишь ≈ 20 КДж/кг. Во втором -- уже знакомые нам 10-30 МДж/кг. Наконец, если сделать сферу полой, то предел определится её прочностью на разрыв.

А если поле не электрическое, а магнитное? Ну вот взяли кольцо из сверхпроводника радиусом R , толщиной проволоки $2r$, запустили в нём электрический ток силой I , охладили -- и пожалуйста: бежит по кругу вечно ток, энергия в магнитном поле ждёт употребления. Чем не идеальный аккумулятор?



Но вспомним, что противоположно направленные токи отталкиваются. Поэтому на кольцо будет действовать разрывающая сила. Для противостояния которой надо обладать некоторой массой и упругостью. Избавив читателей от подробностей подсчёта, сообщу, что и здесь запасённая в кольце энергия оказывается приблизительно равной всё тому же отношению σ/r .

Тут знающие люди наверняка подумали: "Бессильная конфигурация! А как же бессильная конфигурация?!" Есть [380] такая штука. Именно с магнитным полем возможна хитрая геометрия, при которой поле оказывается параллельным току в системе -- и, таким образом, не оказывает на этот ток никакого силового воздействия. В простейшем варианте такой конфигурации ток заворачивается по спирали, поле заворачивается в ту же сторону и сила на провода (почти) не действует:

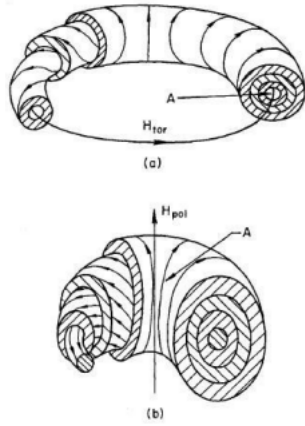


Figure 2.5 Force-reduced toroids with small and large aspect ratio. The experimental region is marked by *A* (Furth et al. 1988).

[Image credit: Szabolcs Rembeczki, Design and Optimization of Force-Reduced High Field Magnets, [370]]

Подобная конструкция, на первый взгляд, выводит, наконец, обычную материю из роли пружины и перепрыгивает Пружинный Предел. Однако не тут-то было. Тщательный и аккуратный анализ [370] показывает, что, во-первых, бессильное состояние возможно лишь в отдельных точках пространства -- но не во всём пространстве; и во-вторых, бессильная система **конечного** размера всё равно требует внешних подпорок для своего существования. Более того, Szabolcs Rembeczki приводит точный результат другого автора (G. E. March) от 1996 года, где полный запас энергии в подобной системе сравнивается с упругой энергией этих подпорок:

2.3.2 Application of the Virial Theorem in Practice

The virial theorem expressed in form of equation 2.14 is true for an ideal, closed magnetic system. In a real magnet the forces that counteract the magnetic pressure are typically bigger than the magnetic field energy of system under consideration:

$$\frac{1}{2\mu} \int B^2 dV \leq - \int f_{ci} \cdot x_i dV - \int M_{ij} x_i dS. \quad (2.15)$$

This form of the virial theorem sets a lower limit on the mass of the support structure. The left hand side of eq. 2.15 is the stored E energy in the magnet, so it can be written as:

$$\frac{1}{2\mu} \int B^2 dV = E \leq \sigma_w V, \quad (2.16)$$

where the acting stress σ_w is assumed to be constant throughout the V volume of the support structure. If ρ and M are the density and mass of the structural material respectively, then equation 2.16 determines a lower limit on the mass of the structural material (G. E. Marsh 1996):

$$M \geq \frac{\rho \cdot E}{\sigma_w}.$$

[Image credit: Szabolcs Rembeczki, Design and Optimization of Force-Reduced High Field Magnets, [370]]

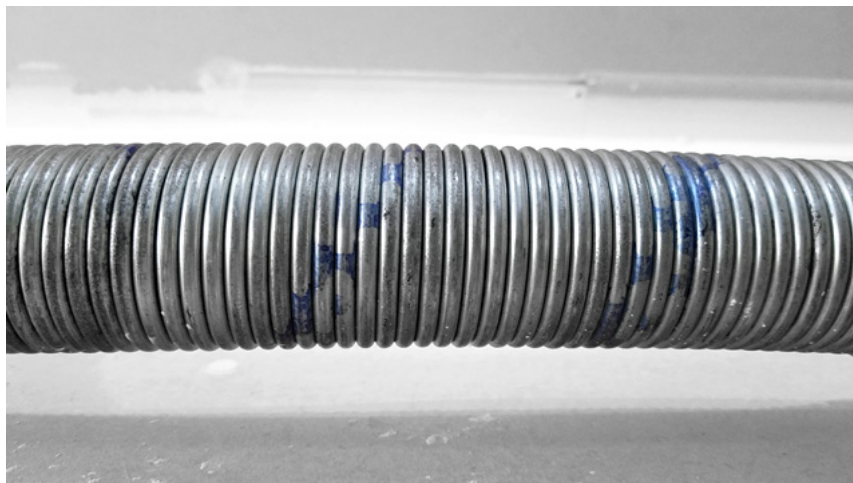
Чуть переписав последнее выражение, получаем: $E/M \leq \sigma/\rho$. То есть, энергия к массе по-прежнему не превышает Пружинного Предела.

Наконец, кратко коснёмся расплавленной соли, ибо тема эта популярна. Сколько энергии может хранить килограмм расплава? Очевидно, это энергия, потребная на разогрев до температуры плавления, плюс удельная теплота этого самого плавления. Первая из двух ничтожна: поскольку 1 эВ на атом -- это 11600 градусов, то, очевидно, никакое твёрдое тело не может содержать более ≈ 0.4 эВ/атом тепла. Вторая определяется энергией связи твёрдой решётки и по этой причине не превышает единиц эВ на атом. Например, у поваренной соли **NaCl** (вещества близкого к полной ионности и относительно безвредного) теплота плавления составляет [660] 0.52 МДж/кг, или порядка 0.3 эВ на атом. На чём данную тему можно закрыть.

Итог получается грустный и немного забавный.

Несмотря на тысячелетний инженерный прогресс; несмотря на громадное, вроде бы, разнообразие способов хранения энергии, большинство этих способов опираются один и тот же принцип. Принцип, положенный в основу устройства, известного нам уже сотни лет.

Это устройство -- пружина:



Мы -- цивилизация пружин.

Наши ракеты дороги и тяжелы потому, что, фактически, пружина хранит движущую их энергию, плотности которой едва хватает на преодоление земного гравитационного колодца. Пружинный Предел определяет механическую прочность ракет, противостоящую массе взведённой химической пружины топлива. Пружинный предел диктует предельную высоту наших зданий, длину пролётов мостов, ёмкость аккумуляторов, толщину кузовов грузовиков и их пробег с полным баком. Не оттого ли и устройства наши имеют $Q \approx 1$, что пружины противостоят в них пружинам, и равновесие возникает где-то посередине?

Всё, что запасает энергию в перераспределении электрических полей внешних, валентных электронов обычной материи, упирается в Пружинный Предел: 3-4 эВ на атом, или 20-30 МДж/кг. Материя, которой мы повседневно пользуемся, подобна жадному брокеру. Все транзакции идут строго через него: энергия => материя => электрические поля => материя => энергия. Но брокер запрещает хранить на одном счету больше 3-4 электроновольта на атом, и дерёт колоссальную комиссию в виде массы тяжёлого атома за каждый счёт.

И хотя внутренние электроны материи обладают энергиями связи в сотни и тысячи электронвольт, а ядра -- в миллионы и миллиарды, работать мы с этими силами лишь едва-едва начинаем. Пока мы хорошо научились манипулировать только тонкой внешней оболочкой атома. В ней, в виде напряжённости электрического поля, и хранятся почти все энергетические запасы нашей цивилизации.

Какие-нибудь марсиане, глядишь, от подобного осознания давно опустили бы руки псевдоподии. Но мы в следующем разделе посмотрим, какие же обходные пути предлагает Природа в создавшейся ситуации.

Продолжение следует.

Часть 4/5. Дороги и перекрёстки.

Читая этот раздел, следует понимать: всё, здесь перечисленное, либо не работает, либо... потенциально опасно. Ибо всякая возможность направлять и концентрировать энергию находит в первую очередь военное применение. Чингисхан подчинил полконтинента, направив энергию растущей травы (через лошадей) на военные нужды. Англия колонизировала половину планеты, оседлав энергию ветра. Первые быстрые концентраторы химической энергии -- нефтяные зажигательные снаряды и пороховые бомбы. Двигатель внутреннего сгорания таскал на себе броню двух мировых войн по полям и болотам, и продолжает обслуживать бесчисленные столкновения по всему миру. А атомная энергия сначала принесла миру бомбу, и лишь затем -- мирный реактор. Любая возможность обуздать новые потоки энергии, сконцентрировать её, либо быстро высвободить наверняка отслеживается военными.

Но если каждый пункт в разделе -- фантазия или война, то зачем писать? Не лучше ли промолчать?

Мда... "Хотелось бы побыть страусом, да пол бетонный." Я верю, что писать надо. Если что-то работает, пусть об этом знают все. Если нет -- что ж, пусть задумаются тоже все.

Как-то так.

Приступим.

4.1. А полностью ли выжата пружина?

В общем, нет. Есть ещё резервы. Местами серьёзные.

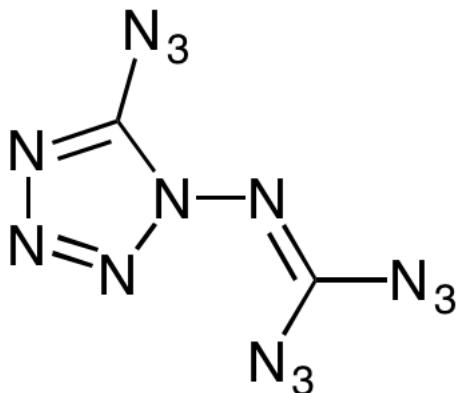
Самый большой -- в прочности материалов. Современные ракеты делаются из металлических сплавов. Граница их удельной прочности -- в районе 0.3 МДж/кг. Даже кевлар и углепластик уже дают вдесятеро большую прочность при том же весе, и это ещё далеко не теоретические предел. Если извернуться и изготовить ту же первую ступень "Протона" из таких материалов, то весить она будет существенно меньше, и разницу (как минимум) можно упихать в полезную нагрузку. В теории. Кхм... В теории, теория и практика едины. На практике, увы, все эти чудесные материалы к строительству ракет пока едва ли готовы. Тут и сложности изготовления крупных конструкций нетривиальных форм, и недобрые рабочие температуры, и ещё проблем на инженерный учебник. Но пространство, куда копать, есть. А первые ласточки^[670] из композитов уже полетели.

Далее, наноматериалы и, в частности, графен^[95]. Сама по себе энергия связи между атомами углерода в нём -- те же скромные 2-3 эВ на атом. Но: а) связей на атом три, и это в сумме даёт^[98] уже до 7.8 эВ/атом; б) углерод -- элемент лёгкий, на килограмм делить выгодно, и: в) решётка у графена абсолютно правильная, без дефектов и "слабых звеньев", готовых преждевременно подвести под нагрузку. Итог^[355]: 62-65 МДж/кг, вдвое выше "повседневного" пружинного предела. Я думаю, что если мы научимся конструировать подобные правильные решётки из бора, который ещё легче, мы и до 100 МДж/кг допрыгнем. И кто знает, не будут ли тогда ракеты будущего запитываться бешено раскрученными маховиками из графена или похожих материалов?

[А в комментариях мне вот такую интересную работу по теме подсказали ^[352]]

Лимон химической энергии тоже ещё выдавлен не до шкурки. И это я не про двигатель на смеси лития, фтора и водорода ^[405], ^[410] (удельный импульс-то у него приличный, но работать с такими смесями я и врагам не пожелаю). Нет, речь пойдёт про экзотические соединения, существующие пока лишь в лабораториях да теориях, но обещающие многое.

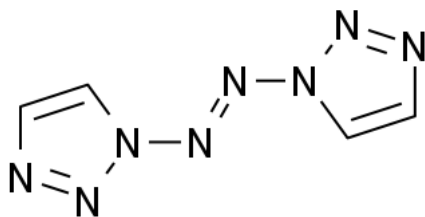
Первый пример^[420] ("извините, я не могу этого сказать", если меня попросят вслух выговорить его название):



[Credit: By Albris - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=47523411>]

Взрывается самостоятельно, "без видимой причины", выделяя энергию в количестве 6.8 МДж/кг. Цифра не слишком внушительная, и для запихивания в ракеты это вещество уж больно нестабильно. Но заметьте: оно состоит преимущественно из азота. Похоже, что азот-азотные цепочки, если правильно их "взвести", запасают немало энергии?

Химики это поняли и уже с десяток лет конструируют^[265] всё более хитрые структуры чуть менее чем полностью из азота. Вот ещё^[430]:



[Credit: By Meodipt - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=13243875>]

Теплота сгорания или образования, к сожалению, не указана. Но это неважно, потому что абсолютный рекордсмен, похоже, уже найден^[440].

Оказывается, под давлением свыше 1.1 миллиона атмосфер и температуре в 2000 К азот переходит в кристаллическую модификацию под названием cubic gauche (по-русски, как мне подсказали, это называется "кубическая гош-модификация"). И эта модификация, если только не врут на радостях^[450], оказывается стабильна при возврате в нормальные условия. И может быть синтезирована при них. Ну, метастабильна, точнее. Поэтому при превращении в обычный азот она выделяет массу энергии. Конкретные цифры разнятся: по ^[450] выходит 15.8 МДж/кг, по википедии^[440] -- 27 и 33 МДж/кг. Если верна последняя величина, то, теоретически, скорость истечения такого двигателя может достигать ≈6700 м/с -- и это с потерями на вращательные степени свободы у азота. Если первая -- 4700 м/с, но и это недурно.

Разумеется, 33 МДж/кг -- это не триста и не три тысячи. Существенно больше из химии всё равно вряд ли получишь. Но даже полтора раза по скорости истечения сокращают стартовую массу ракеты в разы, резко удешевляя запуск. Есть за что бодаться. И кто знает, какие ещё состояния материи удастся получить при высоких давлениях и благополучно "вывести" оттуда в наши нормальные условия?

Из более экзотической химии стоит упомянуть:

4.1.1. Фиксацию атомов (не молекул!) водорода в плёнке твёрдого замороженного водорода [460]. При достигнутых плотностях в $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ это пересчитывается в запас энергии в 2.6 МДж/кг. Хотя по сравнению с традиционными топливами цифра выглядит неярко, сам подход очень необычен. И кто знает, сколько ещё удастся из него получить? Википедия утверждает [470], что аналогичное "растворение" штучных атомов других веществ в жидком гелии позволяет запастись до 5 МДж/кг (правда, по ссылке на работу я пройти не могу).

К этой же группе я бы отнёс попытки [480] создать бозе-конденсат метастабильного гелия $^4\text{He}^*$ в триплетном состоянии $1s2s^3S_1$. Если его период полураспада действительно составляет более двух часов (а оснований не верить я не вижу [490]) при энергии на атом аж в 19.8 электронвольт, то подобная материя, в принципе, способна запастись 475 Мегаджоулей на килограмм! С "выхлопом" в виде чистейшего безвредного гелия. Конечно, при условии, что эти сугубо лабораторные криогенные исследования удастся довести до пригодности к "переезду" на ракету.

4.1.2 Смутные указания ([500], [510]) на трёх- и более высокие валентности цезия и бария намекают, что хотя бы иногда, при каких-то условиях, для образования химических связей можно использовать не только валентные, но и внутренние электроны атомов. От самого этого понимания до "абсолютного топлива" ещё как до Луны пешком (pun intended), но обоснованно пометить есть о чём.

4.1.3 Расплавленная соль бесперспективна, а вот как насчёт испарённой? Теплоты испарения некоторых веществ бывают очень высоки [680]. Так, газообразный бериллий, конденсируясь, выделяет энергию в количестве 32 МДж/кг, бор -- 45. Правда, человек, предлагающий запустить летающий баллон с 2500-градусным газообразным бериллием, в ответ рискует нарваться на шутку про урановые ломы в ртути, тут уж ничего не поделаешь...

На этом закончим с химией и перейдём к другим формам хранения.

4.2. Другие поля

До сих пор мы фокусировались преимущественно на электромагнитном взаимодействии. Но в природе есть как минимум ещё три поля: гравитационное, сильное и слабое. Можно ли создать аккумулятор, запасующий энергию в них?

С гравитационным полем проще всего. Поднял груз на башню -- энергия запаслась. Опустил -- выделилась. На этом принципе основаны гидравлические системы хранения [520] энергии. К сожалению, есть непреодолимая проблема. Поскольку потенциальная энергия -- это mgh , то энергия на килограмм -- это gh . А h , то бишь высота, в земных условиях -- максимум километры. Это единицы **килоджоулей** на килограмм, даже не **мега**. Вот если бы на нейтронной звезде, где g легко может составлять 10^{12} м/с^2 ... Право слово, иногда я подозреваю, что нейтронные звёзды и чёрные дыры -- не что иное, как гигантские электростанции супер-цивилизаций. Ну и в любом случае вряд ли удастся летать в космос на таком "аккумуляторе" -- ведь для движения вверх его придётся **заряжать**, а не разряжать.

Поэтому про гравитационное поле достаточно. Какие у нас есть "более другие" поля?

Сильное [690] -- отвечает за взаимное притяжение протонов и нейтронов в атомном ядре. И слабое [700], отвечает за превращение кварков друг в друга, проявляющееся в распаде нейтрона и бета-распаде ядер. С нашей повседневной точки зрения всё это -- атомная энергия, так что вместе их здесь и рассмотрим, на примере типовых реакций:

- **Радиоактивный распад.** Бывает нескольких видов:
 - --- Альфа-распад. Было ядро урана-238, стало ядро тория-234 да альфа-частица, плюс 4.27 **мегаэлектронвольт** энергии ([530]). Это порядков на шесть больше, чем в химии. Хотя у урана ядра и тяжёлые, всё равно получается 1.7 **Гигаджоуля на грамм**.
 - --- Бета-распад. Был кобальт-60, стал никель-60, плюс электрон, плюс антинейтрино, плюс гамма-лучи, плюс 1.35 МэВ на атом. Стоит отметить, что за (почти любым) бета-распадом на самом деле "сидит" распад нейтрона через слабое взаимодействие, в незамутнённом виде описываемый уравнением $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu_e$ (+ 0.782343 MeV).
 - --- И с десяток других, более редких, видов распада [705].
- **Деление ядер.** Было ядро урана-235, стукнули нейтроном, получилось два ядра каких-нибудь криптона и бария, плюс нейтроны, плюс примерно 180 МэВ на ядро ([540]). Грамм 70 такого делящегося материала по энергии эквивалентны содержимому всех топливных баков "Протона".
- **Термоядерный синтез.** Столкнулись два ядра лёгких элементов, слились в более тяжёлое. Выделилась энергия, плюс побочные частицы. Наиболее прокачанный на сегодня вариант -- реакция дейтерия и трития: $D + T \rightarrow ^4\text{He} + n + 17.6 \text{ MeV}$. Но есть и менее "грязные" и более удобные для сбора энергии реакции.

В виде оружия всё вышеперечисленное освоено уже давно. В мирном виде тоже, кроме термоядерного синтеза. До него с 1950-х годов постоянно остаётся "лет 15-20". Правда, я всё равно верю в этот синтез, как в главное направление решения энергетических проблем человечества.

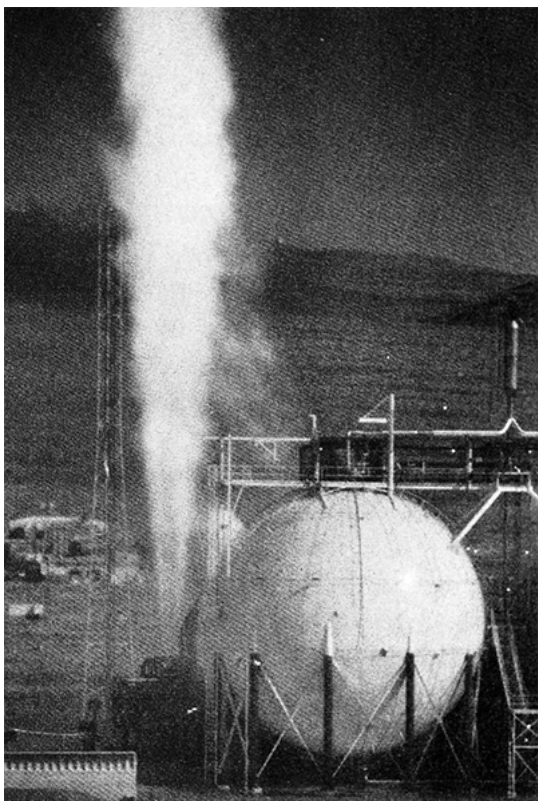
Радиоактивный распад (как плутония, так и более лёгких изотопов вроде **кобальта-60**, **цезия-137**) давно уже активно трудится в радиоизотопных генераторах [710] и атомных батарейках на бета-распаде [720]. Малые ядерные реакторы для (полу)гражданского

12/21/22, 4:10 PM

использования успешно делали ещё с 1950-х годов [555].

Есть и ракетные двигатели на энергии деления ядер.

Вот испытания американской "Нервы" [570], 1966-1972:



[Image credit: William R. Corliss, Francis C. Schwenk - Nuclear Propulsion for Space (pamphlet from United States Atomic Energy Commission, Division of Technical Information) Test of NERVA nuclear rocket engine.]

Вот [580][583][586] советский РД-0410, 1965-1980:



[Image credit [730]]

Тяга к массе у них не очень хорошие, так что для первых ступеней они не слишком пригодны. Над этим можно работать, идеи различной степени внятности есть, только.... только не в этом проблема.

Ведь не столько инженерные, сколько медицинские и политические причины препятствуют сегодня использованию ядерной энергии для освоения космоса. Все боятся (и вполне справедливо) радиоактивного заражения при авариях, ошибках, терроризме. Лечить радиоактивное поражение мы толком не умеем, обеззараживать биосферу -- тоже. Микрограмма кой-каких долгоживущих изотопов достаточно, чтобы

отправить человека на тот свет. Это раз. Два -- от ядерной бомбы до ядерного двигателя дистанция не столь уж велика. Что там на самом деле запускает в стратосферу ~~потенциальный противник~~ партнёр по освоению космоса, поди разбери издали?

Пока эти проблемы не будут решены, я не думаю, что мы увидим серьёзное применение атомной энергии в космонавтике. Так, батареечки для марсохода, может, малый ЭРД на изотопном генераторе, это максимум. До отведения Антарктиды под совместный атомный ракетодром, увы, ещё очень далеко. На расстоянии фантастики.

4.2.1. Однако в рамках этого раздела стоит упомянуть такой забавный эффект, как влияние неядерных сил на периоды полураспада. Мы привыкли думать, что скорость естественного распада атомов -- величина постоянная, ни от чего не зависящая, и полагаемся на этот факт для радиоизотопного датирования [740]. Но это не совсем так. Судя по [750], на период полураспада могут влиять химическое состояние (в том числе ионизация), давление, переход в сверхпроводимость, электрические и магнитные поля, температура. К сожалению, большинство работ по этой теме перекрыты требованиями об оплате, так что, не выкинув на ветер пару сотен долларов, я не могу привести первоисточники и вынужден ограничиться вторичным цитированием или абстрактами. Среди показавшихся мне любопытными следует назвать:

- Изменение скорости распада радиоактивных ^{111}In и ^{32}P из-за вращения в центрифуге -- причём существенное, с уменьшением/увеличением периода на единицы процентов в зависимости от **направления** и скорости вращения [760]. Выглядит даже слишком хорошо, чтобы быть правдой, неплохо бы перепроверить этот результат.
- Уменьшение периода полураспада ^{210}Po на 6.3% просто благодаря заключению его в медную оболочку и охлаждению до 12K [770]. Тоже под вопросом.
- Рений-187, практически стабильный изотоп с периодом полураспада в 42 миллиарда лет, будучи полностью ионизирован (до состояния $^{187}\text{Re}^{75+}$), сокращает время жизни до 33 лет, т.е. становится чертовски нестабильным [780]. И эта работа вполне надёжна.
- Нейтральный диспрозий ^{163}Dy стабилен. Но, будучи полностью ионизирован до $^{163}\text{Dy}^{66+}$, превращается в радиоактивный с периодом полураспада в... 50 дней! [790]

Чем это потенциально перспективно, понятно. Добыча энергии из слишком медленно распадающихся изотопов. Управление мощностью изотопных батарей и реакторов. Стабилизация далёких трансурановых элементов для хранения и изучения. И кто знает, может, даже [убрано от греха подальше]? Правда, любое инженерно разумное воздействие сегодня сдвигает параметры распада максимум на проценты, и физика вроде нигде не предсказывает эдакого "магического пика", но кто знает, кто знает...

4.2.2. Возбуждённые и вращающиеся ядра

Если энергозапас маховика из обычной материи ограничен её прочностью на разрыв, то не улучшатся ли результаты, если "закрутить" материю ядерную? Она-то попрочнее будет?

В целом ответ положительный, хотя за ним прячется столько тонкостей и объяснений, что я вынужден промчаться лишь по самым верхам. Заранее приношу извинения за безмерные упущения и упрощения, с помощью которых эту диссертационную по объёму тему пришлось впихнуть в пару абзацев.

Во-первых, атомное ядро может вращаться более-менее как единое целое. Как эдакая капелька ядерной жидкости ([800], [810], [820]). Типичные спины, до которых удаётся "раскрутить" такие ядра -- это 30-100 \hbar , дальше они "рвутся". Но перед этим запасают по 10-200 МэВ энергии на атом. Подобной "закруткой" можно также инициировать или ускорять распад (даже стабильных) ядер. Правда, методы раскрутки у нас сегодня варварские, для энергетики непригодные: "бомбить" ядра вслепую тяжёлыми частицами в ускорителе, зная, что некоторые удары придутся "вскользь". Ну и время жизни таких ядер обычно невелико, насколько я в курсе (впрочем, тут я не эксперт, буду рад, если знающую люди дополнят).

Во-вторых, ядро может вращаться "по частям". Когда лишь несколько нуклонов в нём переходят на более высокий вращательный уровень ([830], [840]), примерно как и электроны в возбуждённом атоме. Характерные спины таких состояний -- до нескольких десятков \hbar , запасы энергии на ядро -- от десятков эВ до десятков МэВ, а вот времена жизни... времена жизни иногда соблазнительно велики. Так, изомер гафния $^{178m2}\text{Hf}$ "живёт" 31 год [832], гольмия $^{166m1}\text{Ho}$ -- 1200 лет [832], рения ^{186m}Re -- 200 тысяч лет [835]. Переходя из возбуждённого в базовое состояние, такие ядра испускают только гамма-кванты. Нет ни наводящих радиацию нейтронов, ни чрезвычайно грязных осколков, ни альфа или бета-частиц. Всё очень чисто и хотя бы по этой причине привлекательно.

Однако до сих пор непонятно, как закачивать энергию в такие изомеры и потом доставать её обратно. Научные работы по этой теме года с 2000-го стали очень противоречивы [850]. Кто-то заявляет об успехе, другие публикуют опровержения. Выглядит всё это крайне подозрительно.

Стоит упомянуть, что и протон тоже можно "завращать", переведя его в возбуждённое состояние со спином 3/2 и выше ([860], [865]). Уже первое такое состояние обладает энергией на 479 МэВ выше базового. К сожалению, времена жизни этих образований не превышают $1.5 \cdot 10^{-16}$ секунды.

4.2.3 Экзотические атомы [870]

Ну и на закуску -- в принципе материю можно конструировать не только из протонов, нейтронов и электронов, но и из других частиц. Многие "экзотические" ядра синтезированы экспериментально и иногда обладают громадными запасами энергии. К сожалению, все они живут не дольше 10 микросекунд, а обычно гораздо меньше.

4.3. А не уволить ли нам брокера?

Чтобы запастись энергией в напряжённости электромагнитного поля в обход "жадного брокера" обычной материи, требуется вывести это поле из межатомных пространств. Сам путь не нов. Прошедшие лет 200 мы именно по нему и двигались, собрав немало полезных достижений.

Одним из первых начал Вольта (в честь которого *вольт* и вошёл в язык) со своим столбом в 1800-м году:

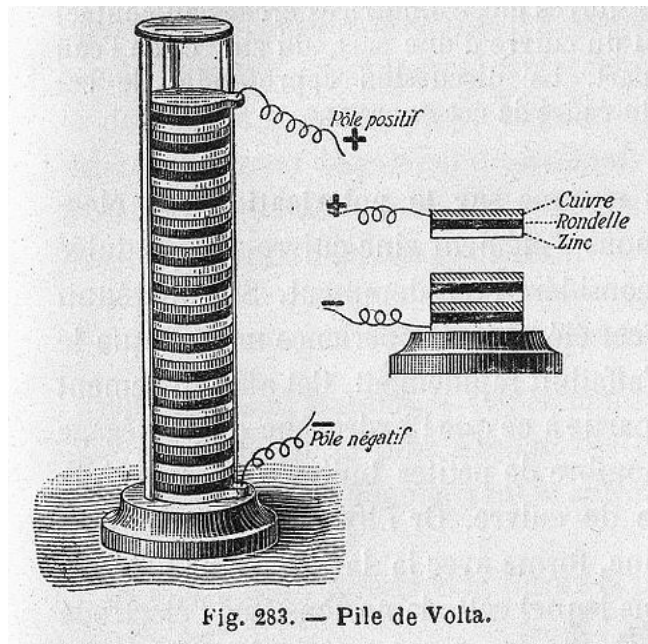


Fig. 283. — Pile de Volta.

Нехитрая стопка чередующихся металлов развивала напряжения в десятки, сотни и тысячи вольт, то есть куда выше валентных, и с приличными токами. Электролиз, запитанный подобным столбом, дал возможность выделить в чистом виде десятки легкоокисляемых металлов вроде магния, натрия и алюминия.

Дальше больше. Передача электричества по проводам. Электродвигатели. Радио и радары, в том числе с мегаваттными мощностями. Лазеры. Ионные и электронные пучки, рентгеновские аппараты. Сварка, плавление и резка электронными пучками, ускорители и искусственно полученные изотопы и новые элементы. Да, признаем честно: большая часть этих изобретений в качестве аккумуляторов энергии малоприменима. Но они показывают: плоды вывода электромагнитного поля на макроскопический уровень вкусны и многообещающи. Почему бы не попытаться и дальше думать в этом направлении? Лично мне это кажется наиболее перспективным.

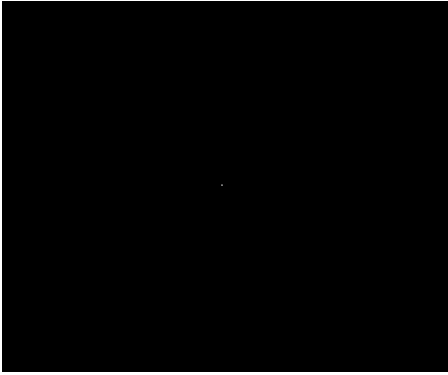
Легко сказать «двигаться в этом направлении», но что конкретно под этим имеется в виду?

Ниж я решил привести пример. Disclaimer. **Я не утверждаю, что описанная ниже штука будет точно работать.** Я не Бор, не Вольта, и даже не Персов и не слишком силён в конструировании экспериментальных установок. Я хорошо понимаю, что на практике для хранения энергии данная конструкция вряд ли пригодна. Но, теоретически, пружинный предел она всё-таки преодолевает. Поэтому делюсь. Исключительно как иллюстрацией возможного хода мысли в данном направлении, и не более того.

Итак, мы хотим сконструировать устройство для хранения энергии в электромагнитном поле, плотностью энергии превышающее Пружинный Предел. Это значит, что в значительной части устройства **обязаны** возникать очень высокие давления полей $p = (E^2 + B^2)/8\pi$. Противостоять им обычной материей нельзя: упруёмся в Пружинный Предел (σ/ρ). Какие другие силы можно ему противопоставить? Электромагнитную в чистом виде нельзя по Теореме Ирншоу^[880] (хотя есть смутные догадки: а что, если собрать нестабильную систему, **не** находящуюся в равновесии?) Гравитационную тоже: слишком слаба на наших масштабах. Остаётся ядерная. Итак, делаем ставку на сильное взаимодействие.

Берём ядро криптона Kr . Обрываем с него все электроны, чтобы получить ион Kr^{36+} . Полная энергия, потребная на это, находится суммированием цифр в таблице 19.2 на стр 411 из [290] и составляет примерно 76340 эВ. Именно столько и выделится (в основном в виде фотонов), если позволить этому атому нахватать электронов обратно. В расчёте на килограмм это 87 мегаджоулей -- неплохо для начала.

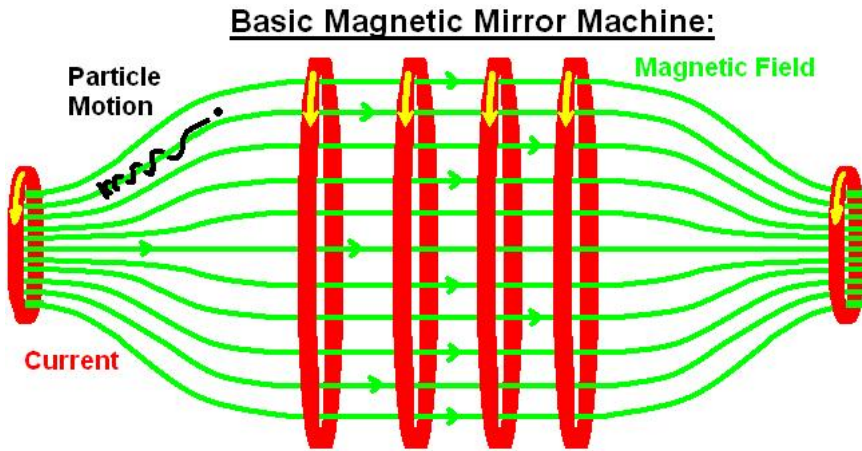
Итак, вот он, сверхэнергёмкий конденсатор: **сферический** полностью ионизированный атом криптона, одиноко плавающий в бесконечном вакууме:



Правда... "что-то здесь не так". Много ли запасёшь в одном атоме? Надо же много. Но как только мы сделаем таких атомов хотя бы два, взаимное отталкивание тут же разнесёт их друг от друга по разным углам бесконечности! Получается, эти заряженные ионы ещё как-то в виде коллектива хранить надо. Потенциальная яма нужна, в которую их запихать можно. Из чего её сделать?

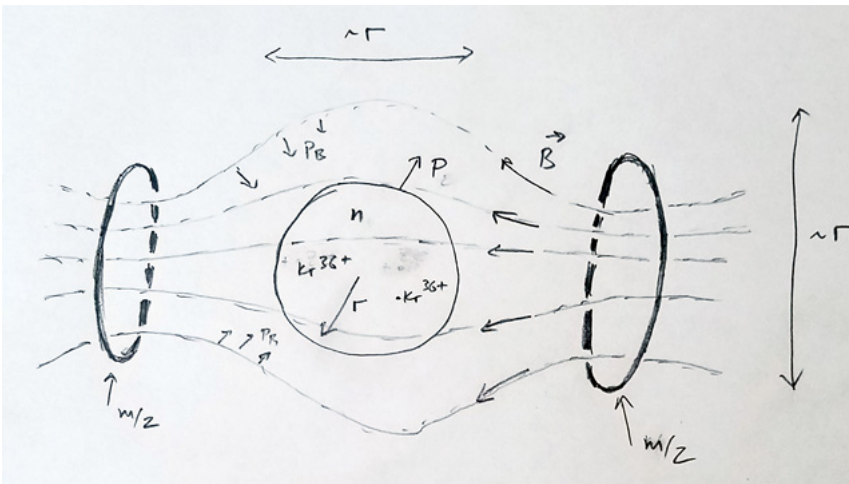
Идём по второму кругу: из обычной материи нельзя -- заряженные атомы тут же к ней притянутся и надёргают из неё электронов. Из электрического поля нельзя: теорема Гаусса [890] запрещает электростатические ямы без зарядов внутри них, а где заряды, там конец устройству. А вот из магнитного... из магнитного можно попробовать!

Вспоминаем про пробкотрон. Он же магнитная бутылка:



[Image credit: Автор: User:WikiHelper2134, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29562309>]

С точностью до столкновений, конечности градиентов поля и излучения любая заряженная частица, оказавшись в середине устройства, где поле слабо, там и останется, навивая кольца вокруг силовых линий. Будем считать, что всё хранится при (почти) абсолютном нуле и столкновениями можно пренебречь. Сколько положительных ионов можно в такую систему напихать? Оценим грубо, пренебрегая безразмерными числовыми множителями вроде 3 или π . Это, конечно, приведёт к ошибке до пары десятков раз, но сильно упростит расчёты; а если результат окажется интересным, умные люди после меня и точнее пересчитают.



Пусть характерный размер облака ионов (и всей системы) r . Объёмная плотность облака n . Заряд ионов eZ . В облаке, таким образом, содержится заряд $q = r^3 neZ$, а электрическое поле отталкивания на его поверхности $E = q/r^2 = reZn$. Распикивающее

давление этого поля на облако составляет $p = E^2 = (reZn)^2$. Ему противостоит небольшая доля β полного магнитного давления системы B^2 :

$$(reZn)^2 \approx \beta B^2$$

Магнитная энергия системы составляет $B^2 r^3$. Чтобы её обеспечить, требуется прочная механическая система (катушки, упоры) массой $m = X \cdot B^2 r^3 / (\sigma/\rho)$, где X -- "коэффициент хреновости" конструкции, показывающий, во сколько раз она тяжелее минимально возможной (согласно [370], в лучших современных катушках X составляет 10-30), а (σ/ρ) -- Пружинный Предел материала катушки. Выразив B^2 из предыдущего выражения, получим оценку для массы "аккумулятора": $m = X r^3 (reZn)^2 / (\beta (\sigma/\rho))$

Наконец, сколько же энергии в этих ионах? Полная энергия ионизации иона, если просуммировать приблизительно [900], составляет $W \approx Z^2 \cdot Ry$, где $Ry = 13.6$ эВ -- энергия Ридберга. У нас nr^3 этих ионов. Итого, в системе содержится потенциальная ионизационная энергия $W = Z^2 \cdot Ry \cdot nr^3$.

Теперь делим первое на второе, получаем запас энергии в джоулях на килограмм:

$$w = W/m = (\beta/X) \cdot (Ry/ne^2 r^2) \cdot (\sigma/\rho)$$

Последняя скобка -- это пружинный предел. А всё перед нею -- это во сколько раз он превышен. При каких условиях это превышение окажется хотя бы единичным (т.е. есть смысл бороться за конструкцию)? Записываем:

$$K = (\beta/X) \cdot (Ry/ne^2 r^2) > 1$$

Вспомним выражение для энергии Ридберга $Ry = e^2/2r_b$, где r_b -- боровский радиус $r_b = \hbar^2/me^2$. Получаем условие, при котором Пружинный Предел преодолевается:

$$nr^2 r_b < (\beta/KX)$$

Т.е. **система либо достаточно маленькая, либо с достаточно разреженным облаком ионов** гарантированно перепрыгивает Пружинный Предел. Достигается это благодаря своего рода "рычагу" из магнитного поля. Где обычная материя "держит" магнитное поле, а поле "держит" высокозаряженные ионы.

Правда, если $r = 100$ см, $X = 30$, $\beta = 0.1$, $K = 1$, то n не должно превышать $6 \cdot 10^1$ см⁻³. Это **очень** "жиденькая" плазма. Полное содержание энергии в такой ловушке составит $W \approx Z^2 \cdot Ry \cdot nr^3 = 10^{-7}$ Джоуля. По массе-то может и хорошо, но по полному энергосодержанию плачевно. Надо либо ловушку увеличивать до планетарных размеров, либо... "всю систему менять". Делать её квазинейтральной, например. Или попытаться держать тяжёлые ионы не магнитной ловушкой, а, скажем, [клизотроном](#). В общем, есть над чем подумать.

В целом, получилась... "пустышка", она же "гидромагнитная ловушка, как ее... объект семьдесят семь-бэ". Но хоть поразвлекётся без нарушения законов физики вроде бы удалось.

===

4.4. А зачем вообще таскать энергию ракету себя с собой?

В принципе, низачем. Если сделать ракету незамкнутой системой, можно многого добиться. Часть этих идей уже работает, другие от практической реализации бесконечно (и, возможно, перманентно) далеки. Я собрал их здесь, чтобы показать: альтернативы есть. Пусть и разной степени достоверности.

4.4.1. "Дышащие" двигатели, которые не везут кислород с собой.

В авиации трудятся уже давно, но на скоростях до 3-4 Маха. Уверенный прорыв за этот потолок случился только в этом столетии. США, Китай и Индия успешно испытывали [910] скрэмджеты [905] на скоростях в 5-6 Маха (Россия, вроде, даже в 95-м году, но там как-то всё непонятно). Китайский WU-14 [910] способен разогнаться, предположительно, до 10 М. Правда, все эти вкусности делаются не ради освоения космоса, а с целью создать маневрирующую, трудноперехватываемую баллистическую ракету.

4.4.2. Запитка ракеты лазером [920].

Ракета тащит с собой только рабочее тело. На Земле стоит электростанция Какой Угодно Мощности, которая лазером или мазером передаёт энергию на ракету. Может, чтобы прямо испарять рабочее тело. Может, опосредованно, через ЭРД. Выглядит очень перспективно. На практике затруднено: и поток энергии такой силы через воздух фокусируется плохо, да и лазер подобной мощности сделать непросто.

4.4.3. Запитка ракеты... по проводам!

Безумно? Безусловно. Но ПТУРЫ на 4 километра по проводам летают [930]. Можно ли сделать хотя бы на 10, и передать по ним хотя бы гигаватт мощности? Я тут прикинул и получил, что по стально-алюминиевому "проводу" радиусом 5 сантиметров можно передавать 1 гигаватт в течение 100 секунд на 10 километров до того, как этот провод потеряет прочность из-за перегрева. Правда, 400 тонн такой "провод" весить будет. И гибкости никакой. И что обидно, параметры материала провода (плотность, удельное сопротивление, теплоёмкость,

допустимый нагрев) входят в [выражение для радиуса](#) лишь в степени 1/6. То есть, никакими разумными заменами материала эти 5 сантиметров в 5 миллиметров не превращаются. Но! 5 сантиметров -- это же почти... рельсы. Получается рельсотрон [940]. Причём, если выбрать материал попрочнее, то его километров в 10 длиной сделать можно. А это, считай, почти замена первой ступени.

4.4.4. (Я уже слышу, как скандируют) **космический лифт.**

К сожалению, у этой идеи, помимо очевидных трудностей (например, куда девать уже шастающие по орбитам спутники?), есть одна фундаментальная слабость. Если подсчитать давление на разрыв, возникающее у основания такого троса, то по порядку величины получится $p = \rho g R$, где R -- радиус планеты. Приравняв его к пределу прочности материала σ , и найдя отношение σ/ρ , потребное, чтобы этот трос не порвался, получим $\sigma/\rho \approx gR = 60$ МДж/кг. То есть, если космический лифт и возможен, то на самой грани Пружинного Предела нашей материи. Так что сомнительно, очень сомнительно.

4.4.5. "Полёт с сегодняшними телами дальше Луны -- это пешая экспедиция медуз по Сахаре"

Ибо слишком много надо брать с собой систем жизнеобеспечения и защиты, чтобы таскать эти тела по космосу. Если бы мы весили 1 грамм, мы бы уже заселили Солнечную Систему. Если бы мы жили 1 миллиард лет, то летали бы к соседним звёздам на солнечном парусе. Если бы мы были роботами, то не нуждались бы в терраформировании Марса для его заселения и вполне могли бы гулять по Плутону. Желаящие могут продолжить — тема для фантазии благодарная.

Часть 5/5. В масштабе Вселенной

Итак, для нас выход на околоземную орбиту очень дорог. А как обстоят дела с этим вопросом у других цивилизаций -- если они, конечно, есть?

Разумеется, про **все** воображимые формы жизни и разума сказать можно лишь... ничего. Одних нефантастических идей вон сколько напридумано [945]. Но можно попробовать рассмотреть **наиболее вероятные** цивилизации, исходя из того, что мы сегодня знаем и полагаем вероятным. Даже в такой форме вопрос оказывается небезынтересным.

1. Начнём с "их" планеты. Как она выглядит?

Это, скорее всего, небесное тело диаметром 8-15 тысяч километров, состоящее преимущественно из каменных пород и металлов, с небольшой примесью водяных и прочих льдов. Она обращается вокруг звезды на расстоянии, где подсолнечная температура составляет 250-400 Кельвинов. У планеты есть атмосфера с давлением не менее ≈ 0.1 , но вряд ли больше нескольких сотен атмосфер. В атмосфере присутствуют хотя бы сотые доли процента углекислого газа CO_2 . Планета тектонически активна, её плотность -- 4-9 г/см³. Основа биохимии там -- вода и углерод.

Звучит до скуки похоже на Землю, правда? Давайте разберёмся, почему.

Ещё раз повторяю: мы ищем наиболее вероятный расклад. Да, почти на каждом повороте наших рассуждений уместен вопрос: "А почему так, а не наоборот?" И ответом обычно будет: "Да, можно. Но наиболее распространённым сегодня считается всё-таки именно первый вариант".

Начнём с биохимии. Если вообще принять, что основа тамшнего разума -- жизнь, а основа жизни -- химия, то эта химия гораздо лучше работает в жидком растворителе. Молекулы друг к другу близко. Бесплатное перемешивание. А если растворитель "хороший", он ещё и "правильные" молекулы стабилизирует. Поэтому нужна жидкость. Какие есть кандидаты?

Взглянем на химический состав Вселенной:

Nutrition Facts	
Serving Size 1 Universe (10 ⁵⁵ kg)	
Amount Per Serving (atoms)	
Hydrogen	93.37726%
Helium	6.48943%
Oxygen	0.06489%
Carbon	0.03465%
Nitrogen	0.01069%
Neon	0.01010%
Magnesium	0.00311%
Silicon	0.00294%
Aluminum	0.00250%
Iron	0.00244%
Sulfur	0.00147%
Calcium	0.00021%
Sodium	0.00018%
Nickel	0.00014%

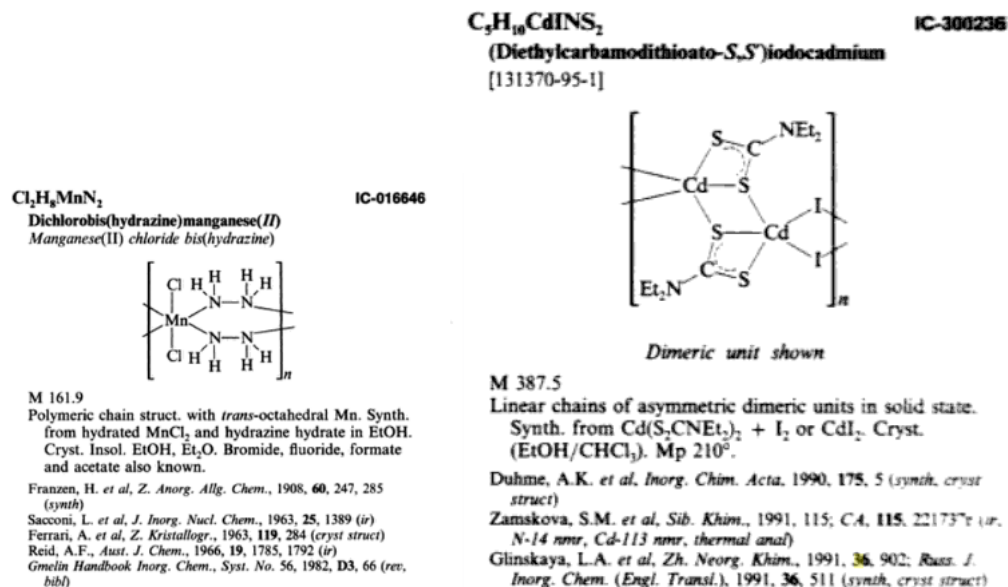
Not a significant source of Phosphorus, Germanium, Fluorine, Chlorine, and all other elements.

В порядке распространённости, какое химическое соединение из этих элементов составляет первым? Правильно. Вода. H_2O . Делается из первого и третьего по встречаемости элемента. Следующее -- метан CH_4 , вдвое реже. Затем аммиак NH_3 , но его в природе уже раз в 6 меньше, чем воды. Да, разумеется, это "в среднем по больнице", индивидуальные планеты могут отличаться химсоставом. Но, если не считать потери водорода, требуются довольно нетривиальные допущения, чтобы обосновать планету, где, скажем, азота будет больше, чем кислорода. Вселенная, в целом, довольно однородна по химсоставу. И вода в ней -- самое распространённое химическое соединение. Скорее удивительно, что иногда всё-таки попадаются места, где воды почти нет...

Помимо распространённости, вода обладает ещё рядом преимуществ по сравнению с первым десятком альтернативных кандидатов. Это: высокая химическая стабильность; сильные водородные связи; наличествующая, но умеренная полярность, ведущая к способности растворять без разрушения огромное количество веществ и поддерживать кислотно-щелочные реакции; высокая теплоёмкость и теплота испарения, повышающие температурную стабильность водоёмов; прозрачность; и, наконец, тот факт, что водяной лёд **легче** жидкости, благодаря чему водоёмы зимой реже промерзают до дна.

Поэтому наиболее вероятный растворитель "у них" -- это вода.

Слово "растворитель" подразумевает жидкое состояние. Значит, средняя температура на поверхности планеты должна быть не ниже хотя бы так 250 Кельвинов. А откуда берётся верхняя граница в 400 К? Она определяется устойчивостью углеродных соединений. Почему углеродных? Из тех же соображений, что и с водой. Да, не только углерод способен образовывать сложные полимеры, "перемежаемые" другими элементами. Это могут делать и бор, и фосфор, и связка кремний-кислород, и даже ряд металлов:



Однако углерод бьёт их по частоте встречаемости в сотни и тысячи раз, оставляя "борной жизни" разве что совсем уж экзотические ниши.

Раз уж мы здесь, поймём ещё вот что. Каково наиболее распространённое газообразное соединение, **не** включающее водород? Взгляд на табличку подсказывает: это углекислый газ CO_2 . Конечно, конкретное его содержание в той или иной атмосфере (как газа) или коре (в виде карбонатов) вот так просто назвать нельзя. Но крайне трудно вообразить планету с неводородной атмосферой и нормальной температурой, где углекислого газа (связанного или свободного) не было бы уж совсем. Хоть 0.01% должно найтись.

И это важно. Ибо распространённость углекислого газа в природе накладывает верхнюю границу на плотность атмосферы. Начиная с некоторой толщины атмосфера, где есть хоть чуток CO_2 , начнёт не просто перегреваться за счёт парникового эффекта. Она начнёт выгонять связанный CO_2 из коры и, таким образом, разогреваться с разгоном. Примерно как на Венере. Трудно сказать, при каком точно давлении это происходит, да и зависит там всё от множества параметров. Но речь, скорее всего, идёт о сотнях атмосфер.

А значит, атмосфера планеты -- не толстая, как у гиганта. Но и не слишком тонкая. Потому что, если давление существенно меньше 0.1 атмосферы, температурный диапазон существования воды в жидком виде резко сужается.

При атмосфере же умеренной толщины температурный режим в значительной степени определяется солнечным освещением. А это значит, что планета обращается вокруг звезды на расстоянии, где естественное солнечное освещение даёт температуру в 250-400 Кельвинов. В так называемой "обитаемой зоне" [\[948\]](#).

Но вода, метан, аммиак и прочие "льды" плохо конденсируются в вакууме при температурах в 250 К и выше. Следовательно, в области формирования планеты их будет мало, и они не станут преобладающими компонентами её состава. Значит, "их" планета сформируется из более высококипящих веществ: металлов и "каменной", т.е. оксидов (и, возможно, карбидов) десятка самых распространённых элементов, перечисленных выше. А это даёт нам примерную плотность её вещества.

Далее, обитаемая планета с химической эволюцией должна сохранять активную тектонику на протяжении миллиардов лет. Потому что иначе климат планеты с водой и CO_2 в атмосфере сваливается в "ледяной шар" и/или марсоподобное состояние. Луна и Марс в Солнечной Системе тектонически давно уже (почти) мертвы. А вот Земля и Венера -- нет. Значит, нижняя граница диаметра планеты проходит где-то между Марсом и Венерой. Тысяч так 8 километров. Да, избыточное количество радионуклидов может обеспечить разогрев и активность и куда меньшего тела. Но это чуть менее вероятное решение. Потому что количество радиогенного тепла пропорционально первой степени массы планеты, а аккреционного и тепла дифференциации -- квадрату. То есть, "в среднем по природе" проще обеспечить активность недр большей массой, нежели большей концентрацией радионуклидов. И да, конечно, планета, являющаяся спутником какого-нибудь гиганта вполне может разогреваться приливными эффектами (как Ио), но крупных экзолун мы пока толком не нашли, так что вряд ли и этот вариант типичен.

Верхняя же граница размера определяется переходом к гигантизму. Выше какого-то предела по массе начинается удержание (а то и захват) водорода и гелия, и на выходе получаем Нептун или даже Юпитер. Оценки массы, при которой это случается, разнятся, я видел цифры от 2 до ~10 земных масс, но эта верхняя граница, как мы ниже увидим, не так уж и важна. Так что просто примем верхний радиус за 2 наших, т.е. 13 тысяч километров.

Ну и последнее. Зная примерный химсостав ("камни" с металлами) и размер, можно прикинуть плотность планеты с учётом сжатия. Будет где-то 4000-9000 кг/м³.

Дальше проще.

2. Первая космическая скорость на небесном теле такого размера и плотности составляет 4000 - 20000 м/с.

3. Используемое "ими" топливо, по крайней мере на начальных этапах космонавтики, вряд ли сильно отличается от нашего. Химия везде одинакова, а "хороших" лёгких и высокоэнергичных реагентов -- всего-то с десятков. А тогда скорость истечения двигателей "их" ракет должна на практике ограничиваться теми же ~4500 м/с, что и наших.

4. Применяя формулу Циолковского, находим, что отношение M/m для "их" ракет будет находиться в диапазоне 2.5 -- 85. Учтём инженерное несовершенство, гравитационные и прочие потери, которые (для нас) превращают теоретически ожидаемое отношение $M/m \approx 13$ для Протона в тридцатку. Что для "них" превращает M/m в 5 -- 200.

5. Поскольку ракета, получается, состоит в основном из топлива, величина Q_2 (определяемая как масса нагрузки плюс топлива к сухой массе конструкции) у "них" тоже оказывается не ниже, чем 5 -- 200.

6. Но конструкция, работающая в режиме высоких Q_2 , дорога. Если принять выведенную ранее формулу $C(Q_2) \approx (Q_2+1)^2/4$, получится, что "их" ракеты дороже "их", скажем, грузовиков (при той же массе) в 9 -- 10000 раз. Всё по порядку величины, разумеется.

Левая граница выглядит нестрашно. Однако большинство "типичных" случаев стоит ожидать ближе к середине этого диапазона. Так, для Земли это отношение составляет примерно ≈ 300 .

Этот вывод можно описать и формулами, в которых, как ни странно, вновь появляется -- и исчезает! -- Пружинный Предел.

Вспомним выражение для первой космической скорости: $V_1^2 = GM_p/R$. Раскрыв массу планеты M_p , получим $V_1^2 = (4\pi/3)G\rho R^2$.

Далее, чему равно u ? У химической ракеты оно **не больше**, чем $\sqrt{2q}$, где q -- теплота сгорания самого высокоэнергичного химического топлива. Отсюда следует:

$$V_1^2/u^2 > (4\pi/3)G\rho R^2/q \quad [10]$$

Теперь вспомним, что дело происходит на планете. А планета -- это такая штука, которая никак не может иметь форму чемодана или снеговика, в отличие от астероида Ultima Thule^[950]. Ибо если даже она каким-то катастрофическим образом эту форму примет, материал планеты тут же "поплывёт" под давлением собственного веса и вернётся к сферическому состоянию. Это свойство, собственно, и есть ключевая часть определения планеты^[960]: "<...> тело <...> **достаточно массивное, чтобы иметь шарообразную форму под воздействием собственной гравитации** <...>".

Например, давление в центре Земли составляет^[970] $3.5 \cdot 10^{11}$ паскалей. Это гораздо выше, чем предел прочности^[355] самых стойких минералов, по какой причине все они в глубине планеты ведут себя скорее как вязкая жидкость, нежели как твёрдые вещества.

Введём в обращение "коэффициент планетарности" Π , равный отношению давления в центре планеты к пределу прочности составляющих планету материалов:

$$\Pi = p/\sigma \quad [15]$$

Для Земли Π -- это что-то около 1700, для Марса -- 250, и даже для Луны -- примерно 45. В целом, для крупных, тектонически активных планет (независимо от состава) $\Pi \gg 1000-3000$.

Остался сущий пустяк: выписать формулу для давления в центре планеты. В первом приближении оно оценивается как $p \approx \rho g R/2$, где ρ - плотность планеты, а R -- её радиус. Подставив сюда $g = GM/R^2$ и $M = (4\pi/3)\rho R^3$ получаем:

$$p \approx (2\pi/3)G\rho^2 R^2.$$

Ух ты! А это очень похоже на формулу [10]. Почти те же множители! Что если совместить? Получится:

$$V_1^2/u^2 > 2p/(\rho q) \quad [20]$$

Но ведь p завязано на "коэффициент планетарности". А именно, $p = \sigma \Pi$. Подставим и это:

$$V_1^2/u^2 > 2\Pi\sigma/(\rho q)$$

Перепишем чуток:

$$V_1^2/u^2 > 2\Pi \cdot (\sigma/\rho)/q$$

(σ/ρ) -- это Пружинный Предел энергосодержания материи. Реализующийся, правда, лишь в наиболее прочных материалах вроде графена. Реальные горные породы помягче и поменьше энергосодержанием будут. Пусть в K раз. То есть, для реальных планет (σ/ρ) -- это Пружинный Предел, делённый на K . А что такое q ? Это же энергосодержание лучшего химического топлива! Равное... Пружинному Пределу! Два Пружинных Предела сокращаются, и остаётся:

$$V_1^2/u^2 > 2\Pi/K$$

K для типичных каменных материалов составляет 100-1000. Π у больших планет -- от тысячи и десятков тысяч. Поэтому практически на любой тектонически активной планете с атмосферой первая космическая скорость существенно выше предельной скорости истечения химического двигателя.

Какие следуют выводы?

- На нижнем диапазоне масс обитаемых планет стоимость вывода на орбиту относительно невысока. Всего в десяток раз дороже доставки того же груза грузовиком.
- Для большинства обитаемых планет этот параметр составляет несколько сотен, как и для нас.
- На самых крупных планетах он составляет десятки тысяч. Примерно столько же, во сколько для нас обходится запуск межпланетных зондов с третьей космической скоростью без гравитационного манёвра. Если бедолаги с такой планеты начали свою космонавтику одновременно с нами, то сейчас они, очевидно, празднуют запуск примерно третьего искусственного спутника. И отчаянно мечтают о пилотируемом полёте.

В целом, **почти на всём диапазоне реалистичных параметров обитаемых планет** стоимость вывода груза на орбиту оказывается экспоненциально велика. Ракеты-носители почти наверняка дороги у всех. И пока мы тут сидим и читаем эту статью, где-то в далёких-далёких галактиках тамошние Королёвы, Маски и Брауны тужатся, выигрывая граммы веса и секунды удельного импульса, с руганью упираясь в Пружинный Предел. Почти все планетарные цивилизации, если они вообще есть, вынуждены решать проблему, которая стоит сейчас перед нами: как перепрыгнуть, обойти, подлезть под Пружинный Предел.

У большинства есть три направления действий.

Либо попытаться выжать до конца пружину за счёт наноматериалов и успехов в экзотической химии. Не самая плохая идея.

Либо "уволить брокера", развивая неядерную физику высоких энергий. Мне этот путь нравится, но я понимаю, что это вполне может быть лишь моей личной иллюзией.

Либо развивать ядерную энергетику. Но тут всё плохо. Существа, возникшие в результате химической эволюции, скорее всего должны бояться радиации с её энергиями квантов, на порядки превышающей энергии связей в химических молекулах. Да, наверно, в принципе, можно найти средства радикальной репарации живых клеток, даже для всей биосферы. Вон, *Deinococcus radiodurans* [980] переносит дозы облучения в 10-30 раз большие, чем даже его бактериальные собратья, доказывая теорему принципиальной возможности починки ДНК в живом организме. Однако ж есть громадная разница между одной бактерией и всей биосферой, и отнюдь не факт, что она преодолима. Я лично сильно сомневаюсь.

Я сказал три пути? Есть, однако, четвёртый. Он доступен нам, и ещё немногим счастливицам.

А именно, забрасывать на ближайшие спутники телеуправляемых роботов. Чтобы силами этих роботов строить города, заводы, ракеты, станции из местных материалов, не таская их со дна гравитационного колодца тяжёлой планеты. Нам в этом смысле **очень** повезло. У нас, на расстоянии в каких-то 1.25 световой секунды, имеется Луна. С огромным запасом ресурсов. Чтобы управлять с Земли лунным роботом по телевизору, не требуются мощные системы искусственного интеллекта. Это задача, решённая ещё в 1970-х. И это решение можно радикально улучшить, призвав на помощь современные робототехнику, программирование и машинное обучение. Следующий ход здесь, в некотором смысле, за читателями Хабра.

Но, скорее всего, далеко не все цивилизациям выпала такая удача. И у многих из них никакой луны рядом нет.

Отчего я сильно подозреваю что, по мере улучшения наших способностей к детектированию цивилизаций, нам, при взгляде на обитаемый космос, будет открываться картина, всё более и более похожая вот на это:



Огромное всем спасибо и хорошего 2019-го года!

====

Текст такого размера невозможно написать без неточностей и ошибок. Я ценю дельные замечания хабровцев и поправки. И я рад, что на хабре столько знающих и думающих людей.

Но, по всей вероятности, это — последний мой большой пост для Хабра как минимум на год. Ибо нельзя безнаказанно нарушать закон сохранения энергии. А я его нарушал долго и безбожно. Ведь написание подобной статьи занимает многие месяцы, а обдумывание — годы. И это труд, серьёзно мешающий задачам выживания: работе, собеседованиям, семье и починке кранов. Отнимающий время в угрожающих нормальной жизни и карьере масштабах. На Хабре это усилие, увы, слабо компенсируется. Работу в России я не ищу. Тема статьи непрофильная. Простая попытка попросить криптовалюты на завершение цикла даже в хабе "я пиарюсь" вызывает такую бомбёжку кармы, что ещё час — и я ушёл бы в read-only, а вы эту статью никогда бы не увидели.

Тем не менее, я не прощаюсь, и ещё раз всем спасибо!

В заключение хочу вынести громадную персональную благодарность:

- [420] Азотные кольца: <https://en.wikipedia.org/wiki/1-Diazidocarbamoyl-5-azidotetrazole>
- [430] Азотные кольца: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja103525v>
- [440] Nitrogen cubic gauche: https://en.wikipedia.org/wiki/Solid_nitrogen#Cubic_gauche
- [450] Метастабильность кубического азота: <https://www.nature.com/articles/s41467-017-01083-5>
- [460] Атомарный водород в твёрдом: https://www.researchgate.net/publication/238971408_Stabilization_of_high-density_atomic_hydrogen_in_H-2_films_at_T_05_K
- [470] Helium impurity condensates: https://en.wikipedia.org/wiki/Helium_compounds#Impurity_helium_condensates
- [480] Bose-Einstein Condensation of Metastable Helium Atoms, ACADEMIC THESIS, Andrey Sergeevich Tychkov, Novosibirsk, Russia: https://www.nat.vu.nl/en/images/Tychkov.thesis_tcm69-96948_tcm208-249866.pdf
- [490] Radiative Decay Rates of Metastable Triplet Helium and Heliumlike Ions, Lauren L. Moffatt, University of Windsor: <https://scholar.uwindsor.ca/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=5913&context=etd>
- [500] Forcing Cesium into Higher Oxidation States Using Useful hard x-ray Induced Chemistry under High Pressure, D Sneed et al 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 950 042055: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/950/4/042055/pdf>
- [510] Barium in High Oxidation States in Pressure-Stabilized Barium Fluorides, Dongbao Luo, Yanchao Wang, Guochun Yang, and Yanming Ma, The Journal of Physical Chemistry C 2018 122 (23), 12448-12453, DOI: 10.1021/acs.jpcc.8b03459: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jpcc.8b03459?src=recsys&journalCode=jpccck>
- [520] Гидравлическое хранение энергии: https://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage_hydroelectricity
- [530] Урановая серия распада: https://en.wikipedia.org/wiki/Decay_chain#Uranium_series
- [540] Ядерное деление: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fission
- [550] Распад нейтрона: https://en.wikipedia.org/wiki/Free_neutron_decay
- [555] Малые ядерные реакторы: <http://forumonenergy.com/2015/03/13/the-history-of-small-modular-reactors/>
- [560] Договор о запрете ядерных испытаний в космосе: https://en.wikipedia.org/wiki/Partial_Nuclear_Test_Ban_Treaty
- [570] Nerva, двигатель: <https://en.wikipedia.org/wiki/NERVA>
- [580] РД-0410: <https://en.wikipedia.org/wiki/RD-0410>
- [583] РД-0410: <http://www.astronautix.com/r/rd-0410.html>
- [586] РД-0410: <https://www.flickr.com/photos/martinrolle/12341329173>
- [590] Конвертирование между единицами СИ и СГС: <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/100/440.htm>
- [600] Севморпуть, советское ледокольно-транспортное судно (лихтеровоз) с атомной силовой установкой: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Севморпуть_\(лихтеровоз\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Севморпуть_(лихтеровоз))
- [610] Доска объявлений по продаже кораблей: <http://www.seaboats.net>
- [620] Доска объявлений по продаже кораблей: <http://www.vedshipping.com>
- [630] Режиссёр Олег Фомин, фильм День выборов: [https://ru.wikipedia.org/wiki/День_выборов_\(фильм\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/День_выборов_(фильм))
- [640] Про маховики и предел их плотности энергии: https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_energy_storage#Specific_energy
- [650] Лекция про электростатику диэлектриков: <http://physics.usask.ca/~hirose/EP464/ch4-09.pdf> (вообще-то, всё это во множестве советских учебников ещё написано, у того же Тамма или Ландау).
- [660] Телота плавления поваренной соли: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_chloride_\(data_page\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_chloride_(data_page))
- [670] Electron, ракета из композитных материалов: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_\(rocket\)#Design](https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_(rocket)#Design)
- [680] Энтальпии парообразования элементов: https://en.wikipedia.org/wiki/Enthalpy_of_vaporization#Selected_values
- [690] Сильное взаимодействие: https://en.wikipedia.org/wiki/Strong_interaction
- [700] Слабое взаимодействие: https://en.wikipedia.org/wiki/Weak_interaction
- [705] Типы радиоактивного распада: https://en.wikipedia.org/wiki/Radioactive_decay#Types_of_decay
- [710] Радиоизотопные генераторы: https://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator
- [720] Батарейки на бета-распаде: https://en.wikipedia.org/wiki/Betavoltaic_device
- [730] Картинки РД-0410: <http://astronautix.com/r/russianmarsnuclearthermal.html>
- [740] Описание радиоизотопного датирования: https://en.wikipedia.org/wiki/Radiometric_dating
- [750] Список известных не-ядерных типов воздействий, влияющих на периоды полураспада атомов: <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.ns.22.120172.001121>
- [760] Changes of decay rates of radioactive ^{111}In and ^{32}P induced by mechanic motion. He Yujian, Qi Fei, Qi ShengChu: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11426-007-0030-z>
- [770] First hint on a change of the ^{210}Po alpha-decay half-life in the metal Cu. F. Raiola, T. Spillane, B. Limata, B. Wang, S. Yan, M. Aliotta, H. W. Becker, J. Cruz, M. Fonseca, L. Gialanella, A. P. Jesus, K. U. Kettner, R. Kunze, H. Luis, J. P. Ribeiro, C. Rolfs, M. Romano, D. Schürmann, F. Strieder: <https://link.springer.com/article/10.1140%2Fepjja%2Fi2007-10012-8>
- [780] Observation of Bound-State β^- Decay of Fully Ionized ^{187}Re : $^{187}\text{Re} - ^{187}\text{Os}$ Cosmochronometry. F. Bosch, T. Faestermann, J. Friese, F. Heine, P. Kienle, E. Wefers, K. Zeitelhack, K. Beckert, B. Franzke, O. Klepper, C. Kozhuharov, G. Menzel, R. Moshhammer, F. Nolden, H. Reich, B. Schlitt, M. Steck, T. Stöhlker, T. Winkler, and K. Takahashi. Phys. Rev. Lett. 77, 5190 – Published 23 December 1996. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.77.5190>
- [790] Radioactive decays of highly-charged ions. B. S. Gao, M. A. Najafi, D. R. Atanasov, K. Blaum, F. Bosch, C. Brandau, X. C. Chen, I. Dillmann, Ch. Dimopoulou, Th. Faestermann, H. Geissel, R. Gernhäuser, P.-M. Hillenbrand, O. Kovalenko, C. Kozhuharov, S. A. Litvinov, Yu. A. Litvinov, L. Maier, F. Nolden, J. Piotrowski, M. S. Sanjari, C. Scheidenberger, U. Spillmann, M. Steck, Th. Stöhlker, Ch. Trageser, X. L. Tu, H. Weick, N. Winkler, H. S. Xu, T. Yamaguchi, X. L. Yan, Y. H. Zhang, and X. H. Zhou. https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2015/12/epjconf_cg2015_05003.pdf
- [800] Kungliga Tekniska Hogskolan, Rotational Model (про вращение ядер): <https://www.kth.se/social/upload/5176d9b0f276543c2c2bd4db/CH5.pdf>
- [810] BEHAVIOR OF NUCLEI AT HIGH ANGULAR MOMENTUM, F.S. Stephens, Nuclear Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/14/730/14730706.pdf
- [820] Saddle-point shapes and fission barriers of rotating nuclei. F. PLASIL. Physics Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831-6372, USA. <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/pram/033/01/0145-0159>
- [830] Про ядерные изомеры: <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/pram/033/01/0145-0159>
- [832] Изомеры высокой стабильности: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_isomer#Nearly-stable_isomers
- [835] Изотопы рения: https://en.wikipedia.org/wiki/Isotopes_of_rhenium
- [840] Atlas of nuclear isomers and their systematics. Ashok Kumar Jain and Bhoomika Maheshwari. Department of Physics, Indian Institute of Technology, Roorkee-247667, India: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/104/47104610.pdf
- [850] Противоречия в работах про стабильный изомер гафния: https://en.wikipedia.org/wiki/Hafnium_controversy
- [860] Про "вращение" протона: <https://www.quora.com/What-would-happen-if-a-proton-spun-very-close-to-the-speed-of-light>
- [865] RICHARD WILSON, The Excited States of the Proton, <http://inspirehep.net/record/1381662/files/v1-n4-p128.pdf>

- [870] Экзотические атомы: https://en.wikipedia.org/wiki/Exotic_atom
- [880] Теорема Ирншоу: https://en.wikipedia.org/wiki/Earnshaw's_theorem
- [890] Теорема Гаусса: https://en.wikipedia.org/wiki/Divergence_theorem
- [900] Про потенциалы ионизации многозарядных ионов: https://en.wikipedia.org/wiki/Ionization_energy#Electrostatic_explanation
- [905] Ну да, собственно про скрэнджет: <https://en.wikipedia.org/wiki/Scramjet>
- [910] Известные испытания скрэнджетов: https://en.wikipedia.org/wiki/Scramjet_programs
- [915] Китайский скрэнджет WU-14: <https://en.wikipedia.org/wiki/DF-ZF>
- [920] Статья про разные способы запитки ракет пучками: https://en.wikipedia.org/wiki/Beam-powered_propulsion
- [930] ПТРК Фагот: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Фагот_\(ПТРК\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Фагот_(ПТРК))
- [940] Рельсовый запуск: https://en.wikipedia.org/wiki/Non-rocket_spacelaunch#Electromagnetic_acceleration
- [945] Альтернативные формы биохимии: https://en.wikipedia.org/wiki/Hypothetical_types_of_biochemistry
- [948] Обитаемая зона: https://en.wikipedia.org/wiki/Circumstellar_habitable_zone
- [950] Астероид Ultima Thule, он же "снеговик": [https://en.wikipedia.org/wiki/\(486958\)_2014_MU69](https://en.wikipedia.org/wiki/(486958)_2014_MU69)
- [960] Современное "определение", тьфу, определение планеты: https://ru.wikipedia.org/wiki/Определение_планеты
- [970] Давление в центре Земли (которое примерно вдвое выше, чем получается простой оценкой при равномерной плотности): https://en.wikipedia.org/wiki/Inner_core#Temperature_and_pressure
- [980] Deinococcus radiodurans, радиационно стойкая бактерия: https://en.wikipedia.org/wiki/Deinococcus_radiodurans
- [990] Распространённость химических элементов во Вселенной: https://en.wikipedia.org/wiki/Abundance_of_the_chemical_elements#Universe

===

Text Author(s): Eugene Bobukh === Web is volatile. Files are permanent. **Get a copy:** [PDF] [Zipped HTML] === **Full list of texts:** <http://tung-sten.no-ip.com/Shelf/All.htm> === **All texts as a Zip archive:** <http://tung-sten.no-ip.com/Shelf/All.zip> [mirror: <https://1drv.ms/u/s!AhyC4Qz62r5BhQ9Xopn1yxWMSxtaQQ?e=b1KSII>] === **Contact the author:** h o t m a i l (switch name and domain) e u g e n e b o (dot) c o m === **Support the author:** 1. **PayPal** to the address above; 2. **BTC:** 1DAptzi8J5qCaM45DueYXmAuiyGPG3pLbT; 3. **ETH:** 0xbDf6F8969674D05cb46ec75397a4F3B8581d8491; 4. **LTC:** LKtdnrau7Eb8wbRErasvJst6qGvTDPbHcN; 5. **XRP:** ranvPv13zqmUsQPgazwKkWCeAYecjYxN7z === **Visit other outlets:** Telegram channel <http://t.me/eugeneboList>, my site www.bobukh.com, Habr <https://habr.com/ru/users/eugenebo/posts/>, Medium <https://eugenebo.medium.com/>, Wordpress <http://eugenebo.wordpress.com/>, LinkedIn <https://www.linkedin.com/in/eugenebo>, ЖЖ <https://eugenebo.livejournal.com>, Facebook <https://www.facebook.com/EugeneBo>, SteemIt <https://steemit.com/@eugenebo>, MSDN Blog https://docs.microsoft.com/en-us/archive/blogs/eugene_bobukh/ === **License:** Creative Commons BY-NC (no commercial use, retain this footer and attribute the author; otherwise, use as you want); === **RSA Public Key Token:** 33eda1770f509534. === **Contact info** relevant as of 7/15/2022.

===