Ибатуллин Р. У.

Commentarii de Bello Galactico

Физика релятивистского кинетического оружия

Оглавление

4. Защита от снарядов

В этой главе мы взглянем на приближающиеся снаряды с точки зрения Земли. Смогут ли земляне заметить снаряды в космосе и заблаговременно уничтожить?

4.1. *Можно ли обнаружить снаряды?*

4.1.1. Условия видимости

Для того чтобы приёмник обнаружил источник излучения, мощность этого излучения в приёмнике должна быть выше мощности шума. Шум в приёмнике создаётся внешними посторонними источниками и тепловым движением внутри него самого. На низких частотах (в радиодиапазоне) преобладает внутренний шум, на высоких — внешний.

Мощность внутренних (тепловых) шумов определяется температурой приёмика и равна

$$P_{внутр.шум} = k\,T\,F\,\Delta\nu \qquad (4.1.1)$$

где k – постоянная Больцмана, T — температура, F — коэффициент шумов, $\Delta\nu$ — ширина полосы частот приёмника.

Мощность внешних шумов определяется фоновым излучением неба:

$$P_{внеш.шум} = \epsilon_{фон}\,\Omega\,S_a\,\Delta\nu \qquad (4.1.2)$$

где $\epsilon_{фон}$ - спектральная плотность потока фонового излучения в единичном телесном угле, измеряемая в Вт/(м^2·Гц·ср) и зависящая от длины волны, S_a – площадь антенны, зеркала или другого приёмного устройства, Ω — телесный угол небесной сферы, с которого поступает излучение в приёмник. Последний зависит от диаметра апертуры или антенны приёмника D_a и длины волны λ, и в идеальном случае равен $0{,}1(\lambda/D_a)^2$.

Если источник (снаряды) находится на расстоянии r от приёмника, приближается к нему со скоростью v и излучает одинаково во всех направлениях, причём в полосе частот приёмника спектральная плотность мощности излучения в единичном телесном угле, измеряемая в Вт/(Гц·ср), равна $\epsilon_{ист}$, то на приёмник падает излучение источника мощностью

$$P_{ист} = \epsilon_{ист}\,\delta^2\,\Delta\nu\,S_a/r^2 \qquad (4.1.3)$$

где δ — множитель, связанный с эффектом Доплера (голубым смещением):

$$\delta = \frac{1+v/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \qquad (4.1.3а) \qquad [Ленг, т 1, с. 44]$$

Для v = 0,518 c доплеровский множитель равен 1,77.

Таким образом, из условия видимости снарядов $P_{ист} > P_{внеш.шум} + P_{внутр.шум}$ вытекает ограничение сверху на расстояние, на котором снаряды могут быть обнаружены:

$r_{обн} < \delta \sqrt{\dfrac{\epsilon_{ист}}{\epsilon_{фон} \Omega}}$, если преобладает фоновый шум (на высоких частотах) (4.1.4)

$r_{обн} < \delta \sqrt{\dfrac{\epsilon_{ист} S_a}{k T F}}$, если преобладает внутренний шум (на низких частотах) (4.1.5)

Рассмотрим теперь различные виды излучения снарядов и оценим расстояние, с которого они могут быть обнаружены.

4.1.2. Тепловое излучение

Принимая удары атомов и пылинок космической среды, снаряды перерабатывают их кинетическую энергию в тепловую и избавляются от неё путём излучения. Выше приводились формулы для поглощённой тепловой мощности (3.1.7) и равновесной температуры (3.1.10). Приравняв поглощённую мощность к излучённой, и считая, что ударный рой насчитывает 756 тыс. снарядов радиусом по 2,5 см, получим следующие характеристики теплового излучения роя:

В Местном пузыре:

полная мощность излучения W = 120 кВт;

равновесная температура T = 210 К;

длина волны с макс. спектральной плотностью мощности излучения λ = 25 мкм;

$\epsilon_{ист}$ = $1{,}5 \cdot 10^{-9}$ Вт / (Гц·ср).

Ближняя граница Местного пузыря в направлении созвездия Орла лежит примерно в 20 св. годах от Солнца, и с этого расстояния ($r \approx 2 \cdot 10^{17}$ м) рой снарядов создаёт на Земле поток теплового излучения со спектральной плотностью на длине волны 25 мкм $\epsilon_{ист}/r^2$ = $2 \cdot 10^{-43}$ Вт/м^2 / (Гц·ср). (Для учёта доплеровского сдвига $\epsilon_{ист}$ нужно умножать на δ^3, а не δ^2, как полную мощность). Это неизмеримо меньше спектральной плотности фонового шума Вселенной на этой длине волны ($\epsilon_{фон}$ ~ 10^{-22} в тех же единицах, [Физ. вел., с. 1227]). Столь ничтожно слабое излучение, конечно, в принципе невозможно заметить.

В более плотном Местном облаке снаряды начинают светиться ярче. Характеристики их теплового излучения в этой области:

полная мощность излучения W = 2500 кВт;

равновесная температура T = 430 К;

длина волны с макс. спектральной плотностью мощности излучения λ = 12 мкм;

$\epsilon_{ист}$ = 1,4·10^{-8} Вт / (Гц·ср).

С расстояния 0,01 светового года (10^{14} м) рой снарядов создаёт на Земле поток теплового излучения со спектральной плотностью на длине волны 12 мкм, равный 7·10^{-36} Вт/(м^2·Гц·ср), что всё ещё исчезающе мало в сравнении с фоновым шумом.

Итак, тепловое излучение совершенно бесполезно для обнаружения снарядов в межзвёздном пространстве.

4.1.3. Гамма-излучение

Как отмечалось в гл. 3.1.2, налетающие протоны межзвёздного газа время от времени сталкиваются с ядрами атомов снаряда. В конечном итоге, после цепочки превращений элементарных частиц, рождаются гамма-фотоны с энергиями 0,5 МэВ и 70 МэВ. Первые почти полностью поглощаются в снаряде, а вторые имеют немалую вероятность вылететь наружу. Найдём мощность гамма-излучения снарядов и сопоставим с мощностью фонового космического излучения на той же длине волны. Существует ли шанс обнаружить снаряды по гамма-излучению?

Вероятность межъядерного столкновения равна 0,22. Если принять, что в половине случаев рождается нейтральный пион, который распадается на два гамма-фотона с энергией 70 МэВ, то число рождений таких фотонов в единицу времени равно 0,22 $n\ S_{лоб}\ v$ (где n — концентрация атомов газа, $S_{лоб}$ — площадь поперечного сечения снарядов, v — их скорость). В пузыре частота рождений гамма-фотонов во всех снарядах роя 3·10^{14} с$^{-1}$, а мощность гамма-излучения роя W = 4 кВт; в облаках, соответственно, 1,5·10^{16} с$^{-1}$ и W = 170 кВт.

Чтобы оценить спектральную плотность мощности, нужно знать частотную ширину полосы гамма-излучения, т. е. диапазон возможных значений энергии гамма-фотона. Кинетическая энергия столкновения протона с ядром углерода на скорости 0,518 С в системе центра масс равна 145,6 МэВ. Часть её тратится на образование пиона (энергия покоя 135,0 МэВ), а излишек 10,6 МэВ в той или иной пропорции делится между пионом, протоном и ядром. Таким образом, минимально возможная полная энергия пиона 135,0 МэВ (если ему не достаётся ничего от излишка), а максимально возможная 145,6 МэВ (если излишек достаётся ему весь). При распаде пиона его полная энергия делится между гамма-фотонами пополам. Таким образом, гамма-фотон может иметь энергию от 67,5 до 72,8 МэВ, или частоту (1,63÷1,76)·10^{22} Гц. Ширина полосы $\Delta\nu$ составляет 0,13·10^{22} Гц, а средняя спектральная плотность мощности излучения в единичном телесном угле $\epsilon_{ист} = W/(4\pi\Delta\nu)$ равна

$2{,}5\cdot10^{-19}$ Вт / (Гц·ср) в пузыре и $1{,}2\cdot10^{-17}$ Вт / (Гц·ср) в облаках. (Предполагается, что фотоны разлетаются во все стороны равномерно).

Для земного наблюдателя спектральная плотность потока гамма-излучения снарядов с границы пузыря (20 св. лет) составит $1{,}2\cdot10^{-53}$ Вт/м^2 / (Гц·ср), а из ближайших окрестностей Солнечной системы (0,01 св. года) $2{,}2\cdot10^{-45}$ в тех же единицах. И то и другое исчезающе мало в сравнении со спектральной плотностью фонового шума в этом диапазоне, порядка 10^{-33}. (Тепловые шумы приёмника в этом диапазоне не играют роли). Гамма-излучение снаряда начнёт выделяться на фоне неба только с расстояния порядка 100 тыс. км, а это непозволительно близко. Итак, взаимодействие с космическим газом не позволит обнаружить снаряды ни на каком практически значимом расстоянии.

Тогда, может быть, снаряды «проявятся» во взаимодействии с пылью?

4.1.4. Искры при столкновениях с пылинками

Как уже говорилось, пылинки радиусом больше 1 мкм при лобовых столкновениях вырывают из снарядов капли расплавленного углерода температурой около 4200 К. В космическом вакууме эти капли испаряются в бурном кипении, так что время их существования приблизительно равно $r_{кап} / v_s$, где $r_{кап}$ — радиус капли, v_s — скорость звука в парообразном углероде при 4200 К (v_s = 2,2 км/с). Для внешнего наблюдателя это должно выглядеть как мгновенная вспышка искры. Оценим частоту вспышек и усреднённую по времени мощность излучения таких искр.

Расплавленная в столкновении масса углерода имеет вытянутую форму и за время своего существования не успеет свернуться в шар. Её длина, как указывалось выше, примерно равна 30 000 a (где a — радиус пылинки), а её радиус — около 800 a. Соответственно, принимая форму искры за цилиндрическую, получим площадь её поверхности: $S_и = 2\,\pi\cdot 800\,a\cdot 30\,000\,a = 1{,}5\cdot10^8\,a^2$. Считая, что она излучает как абсолютно чёрное тело с температурой T = 4200 К, найдём мощность теплового излучения: $W = \sigma\,T^4\,S_и = 2{,}7\cdot10^{15}$ Вт/м$^2\cdot a^2$. Время существования искры $t_и = r_{кап} / v_s = 800\,a$ /(2200 м/с) = 0,36 с/м $\cdot\,a$. Энергия, излучённая искрой за время её существования, $E_и = W\,t_и = 9{,}7\cdot10^{14}$ Дж/м$^3\cdot a^3$.

Количество столкновений снарядов в единицу времени с пылинками радиусом от a до $a+da$ (причём a > 1 мкм), согласно функции распределения (3.2.4), равно

$$dN(a)=dn(a)\,S_{лоб}\,v=n_H\,S_{лоб}\,v\cdot A\,a_T^{0,5}\,a^{-4}\,da \qquad (4.1.7)$$

(обозначения см. в начале главы 3.2.3).

Энергия, излучаемая за единицу времени искрами, рождёнными в столкновениях с пылинками радиусом от *a* до *a*+*da*:

$$dW(a) = E_u \cdot dN(a) = 140\,Bm \cdot n_H(cm^{-3})\,a^{-1}\,da \qquad (4.1.8)$$

Энергия, излучаемая за единицу времени всеми искрами (средняя мощность излучения искр)

$$W_{cp} = 0{,}09\,Bm \cdot n_H(cm^{-3}) \cdot \int_{1\,мкм}^{100\,мкм} a^{-1}\,da = 0{,}4\,Bm \cdot n_H(cm^{-3}) \qquad (4.1.9)$$

где в качестве верхнего предела (100 мкм) взят радиус «пылинки-убийцы».

Эта величина составляет 0,12 Вт в облаках и 0,003 Вт в пузыре. По сравнению с тепловым и гамма-излучением снарядов мощность излучения искр ничтожна, но имеет более высокий максимум спектральной плотности, 10^{-5} Вт/(Гц·ср) на длине волны 1,1 мкм. Для земного наблюдателя вспышки искр становятся заметными на фоне неба на расстоянии порядка 100 тыс. км при плотности пыли, соответствующей Местному облаку. Но во внутренней Солнечной системе плотность пыли примерно в 100 раз выше, поэтому и мощность искрового излучения выше в 100 раз, а дистанция обнаружения больше в 10 раз — порядка 1 млн. км. Итак, искрение снарядов может быть замечено за 3 секунды до удара. Это всё ещё слишком близко.

4.1.5. Отражение света Солнца

Мы пришли к выводу, что собственное излучение снарядов можно заметить только внутри Солнечной системы. Но в ней снаряды светятся не только собственным слабым светом, но и отражённым светом Солнца. При радиусе каждого снаряда 2,5 см и их общем числе 756 тыс. совокупная площадь поперечного сечения равна 1500 м^2, как у астероида диаметром около 40 метров. Уже современный уровень астрономии позволяет обнаруживать такие астероиды недалеко от Земли. Попробуем оценить, на каком максимальном расстоянии можно заметить отражение солнечного света от роя снарядов, имея идеальные (предельно возможные) астрономические инструменты.

В оптическом диапазоне удобно выражать яркость источника в звёздных величинах. Найдём звёздную величину роя снарядов в зависимости от его расстояния до Солнца и Земли.

Обозначим световой поток от Солнца (в люменах) как *F*, тогда освещённость снаряда на расстоянии от Солнца $r_{Сол\text{-}снар}$ равна (с учётом доплеровского сдвига) $\delta^2 F / r^2_{Сол-снар}$. Если снаряд обращён к Солнцу плоской поверхностью под прямым углом, и площадь поверхности *S*, а альбедо *A*, то он отражает во всю небесную полусферу световой поток

$\delta^2 A S F / r^2_{Сол-снар}$, а в конус единичного телесного угла $\delta^2 A S F / 2\pi r^2_{Сол-снар}$. Если Земля находится на расстоянии *r* от снаряда и наблюдает его также под прямым углом, то снаряд создаёт на Земле освещённость (с учётом второго доплеровского сдвига) $I_{снар} = \delta^4 A S F / 2\pi r^2_{Сол-снар} r^2$. Освещённость, создаваемая на Земле Солнцем $I_{Сол} = F / r^2_{Сол-Зем}$. И наконец, звёздная величина снаряда

$$M = -26{,}78 + 2{,}5 \log_{10} I_{Сол} / I_{снар} \qquad (4.1.10)$$

где -26,78 — звёздная величина Солнца, наблюдаемая на Земле. Подставив полученные зависимости, найдём формулу для снарядов любого размера и скорости:

$$M = 31{,}09 + 5 \log_{10}[r_{Сол-снар}(а.е.) \cdot r(а.е.)] - 2{,}5 \log_{10} A S(м^2) - 10 \log_{10} \delta \qquad (4.1.11)$$

И окончательно, подставив S = 1500 м^2, A = 0,14 (альбедо углеграфита в видимом диапазоне [Физ. вел., с. 785]), δ = 1,77, и считая, что $r_{Сол-снар} = 1\, а.е. + r$, получим:

$$M = 25^m{,}80 + 5 \log_{10}[(1+r) \cdot r] \qquad (4.1.12)$$

где расстояние измеряется в а. е.

Обратная формула для нахождения расстояния, на котором снаряды наблюдаются с известной звёздной величиной:

$$r = \frac{\sqrt{4 \cdot 10^{0{,}2(M-25{,}80)} + 1} - 1}{2} \qquad (4.1.13)$$

На снимках космического телескопа «Хаббл» (HST) можно различить (после специальной компьютерной обработки) объекты до звёздной величины M_{HST} = 30^m,3. В такой телескоп можно было бы разглядеть рой снарядов на расстоянии 2,4 а. е. Это уже не так плохо: в момент обнаружения на расстоянии 2,4 а. е. снаряды реально будут на расстоянии 1,2 а. е., и до удара останется около 20 минут — по крайней мере, люди успеют укрыться в убежищах. Но можно ли в самом деле различить рой снарядов на таком расстоянии?

Как уже отмечалось, снаряды нельзя увидеть, если плотность потока их излучения ниже таковой у космического фона. Мало иметь яркость выше 30^m,3, надо ещё, чтобы эта яркость не была «размазана» по слишком обширной области небесной сферы. Следует знать не только звёздную величину снарядов, но и т. наз. поверхностную яркость, измеряемую в звёздных величинах на квадратную угловую секунду.

Отражённое излучение Солнца благодаря голубому смещению сдвинется в ближний ультрафиолетовый диапазон (U-полоса в стандартной системе звёздных величин). В работе [Rafelski et al.] вычислена фоновая поверхностная яркость неба в U-полосе, она составляет

31^m на квадратную угловую секунду (р. 4). Минимальная поверхностная яркость роя снарядов, измеренная в звёздных величинах, должна быть меньше этого значения. Оценим её.

Если радиус роя снаряда равен R, то его угловой радиус на расстоянии r равен $(R/r)\,рад=1{,}379\cdot10^{-6}\cdot R(м)/r(а.е.)$ угл. сек., а телесный угол, «вырезанный» роем в небесной сфере, $\Omega=\pi(R/r)^2=5{,}972\cdot10^{-12}\cdot R(м)/r(а.е.)$ кв. угл. сек. Если радиус роя приблизительно равен радиусу Земли, то $\Omega=242/r^2(а.е.)$ кв. угл. сек. Поверхностная яркость снарядов $f_{снар}=I_{снар}/\Omega$, а она же, измеренная в звёздных величинах

$$\mu_{снар}=M_{снар}+2{,}5\log_{10}\Omega=31^m{,}76+5\log_{10}(1+r) \qquad (4.1.14)$$

Отсюда сразу видно, что ни при каких положительных значениях r рой не будет выделяться на фоне неба, т. е. его поверхностная звёздная величина всегда больше 31^m / кв. угл. сек. Даже на очень близком расстоянии рой будет слишком «размазан» по небу. Итак, ни «Хаббл», ни более крупный телескоп не смогут выявить рой ни в 2,4 а. е., ни ближе.

Потерпев неудачу с обнаружением роя как целого, попробуем оценить видимость <u>отдельного</u> снаряда. Формулы остаются теми же, только в (4.1.11) вместо S = 1500 $м^2$ нужно подставить 0,002 $м^2$, а вместо радиуса Земли в формулу для телесного угла — радиус снаряда 0,025 м. Получаем формулы для звёздной величины снаряда

$$M=37^m{,}49+5\log_{10}[(1+r)\cdot r] \qquad (4.1.15),$$

для телесного угла $\Omega=1{,}493\cdot10^{-13}/r^2(а.е.)$ кв. угл. сек., а для поверхностной яркости

$$\mu_{снар}=5^m{,}43+5\log_{10}(1+r) \qquad (4.1.16)$$

Из последней формулы видно, что на расстоянии вплоть до 2 световых лет (!) снаряд будет ярче фонового шума. Что и неудивительно, ведь это компактный предмет, а не разрежённое облако. Но снаряд слишком мал, и его абсолютная яркость ничтожна: 39^m на расстоянии 1 а. е. Прикинем, какого размера телескоп необходим для обнаружения такого объекта.

Диаметр зеркала «Хаббла» D_{HST} = 2,4 м. Предельная звёздная величина телескопа, однотипного с «Хабблом», соотносится с диаметром его зеркала приблизительно по закону $M=M_{HST}+5\log_{10}D/D_{HST}$. Подставив это выражение в (4.1.15), получим формулу для диаметра телескопа, необходимого, чтобы обнаружить рой на расстоянии r (а. е.):

$$D=66{,}1\,м\cdot(1+r)\cdot r \qquad (4.1.17)$$

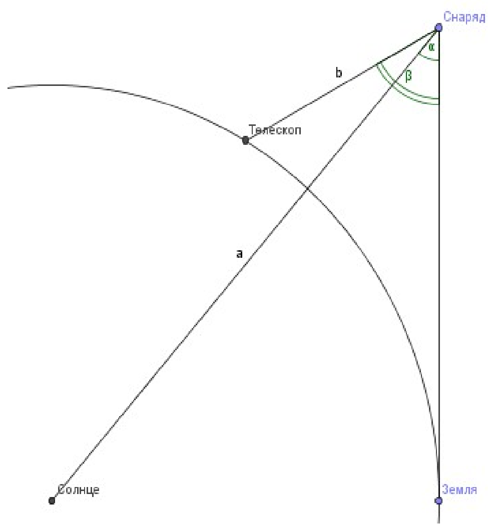
«Супер-Хаббл» с 132-метровым зеркалом может обнаружить снаряд на расстоянии 1 а. е., где его блеск будет равен 39^m. Это даст людям около 8 минут, чтобы добежать до ближайшего укрытия. Телескоп такого размера (наземный, а не космический) в принципе можно построить и сегодня. Но чтобы заметить снаряд в 10 а. е. (блеск 48^m) и получить хотя бы час времени, потребуется «Гипер-Хаббл» с диаметром зеркала 7,27 километра! Конечно, для спасения Земли не жалко потратиться и на такой гигант, но не очень понятно, насколько он реализуем технически. Если и да, то 10 а. е., скорее всего, предел. Для обнаружения в 100 а. е. (блеск снаряда 58^m) потребуется зеркало 670-километрового диаметра, что явно выходит за рамки возможного.

До сих пор считалось, что свет отражается только от лобовой поверхности снаряда. Но боковая поверхность у него в 3200 раз больше, и отражение, соответственно, ярче. Возможно, имеет смысл разместить «Гипер-Хабблы» вне Земли, например, в точках Лагранжа L4 и L5 земной орбиты. Оттуда они могли бы видеть снаряд слегка сбоку, более яркими, притом один из телескопов в момент подлёта оказался бы ближе, что дало бы дополнительный выигрыш во времени.

Будем считать, что телескоп находится в одной плоскости с Солнцем, Землёй и снарядом, и что снаряд отражает свет по закону Ламберта (как идеально гладкий цилиндр). Введём обозначения: a — расстояние между снарядом и Солнцем, b — расстояние между снарядом и телескопом, α – угол между осью снаряда и направлением на Солнце, β — угол между осью снаряда и направлением на телескоп (см. рис. 4.1.1).

Рис. 4.1.1

Геометрия расположения снаряда и телескопа



Тогда телескоп примет отражённое снарядом излучение с плотностью потока

$$I = I_{сол} \frac{\delta(\beta)^4 A}{a^2 b^2} \cdot \left[S_{лоб} \cdot \cos\alpha \cos\beta + \frac{1}{4} S_{бок} \cdot \sin\alpha \sin\beta \right] \qquad (4.1.18)$$

Доплеровский множитель в данном случае зависит от угла:

$$\delta(\beta)=\frac{1+v\cos\beta/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \qquad (4.1.19)$$

Звёздная величина затем находится по формуле (4.1.10).

Численный расчёт показывает, что если телескоп расположен в ближайшей к снаряду точке Лагранжа (точнее, слегка «над» ней), а снаряд приближается по касательной к орбите Земли, то снаряд достигает блеска 48^m для наблюдателя на Земле — на расстоянии 9,3 а. е., а для наблюдателя в точке Лагранжа — на расстоянии 13 а. е. Земной наблюдатель обнаруживает снаряд за 37 минут до удара, а сигнал тревоги из точки Лагранжа получает за 48 минут. Так что некоторый выигрыш во времени есть, хотя и не настолько существенный, чтобы оправдать затраты на строительство двух 7-километровых телескопов в точках Лагранжа.

Итак, дистанцию обнаружения снарядов за счёт отражения ими света Солнца удалось довести до 10 а. е. Нельзя ли ещё увеличить это расстояние, подсветив снаряды искусственно?

4.1.6. Радио- и лазерная локация

Попробуем высветить снаряды мощным радаром. Графит — проводник и хорошо отражает радиоволны при условии, что их длина меньше диаметра снаряда. Будем далее рассматривать длину волны 1 мм. Мощность отражённого сигнала в антенне локатора определяется формулой (с учётом двукратного доплеровского сдвига)

$$P_{отр}=P_{изл}\,\delta^4\frac{G\,S_a S_o}{(4\pi r^2)^2} \qquad (4.1.20)$$

где $P_{изл}$ — мощность излученного сигнала, G – коэффициент усиления антенны, S_a и S_o – площади антенны и отражающего объекта, соответственно, r – расстояние до объекта. Для фазированной антенной решётки диаметром D_a коэффициент усиления равен

$$G=\frac{1}{\Omega}=10\frac{D_a^2}{\lambda^2} \qquad (4.1.21)$$

где λ — длина волны. Подставив $S_a=\pi D_a^2/4$, $S_o=N\pi R^2$ (где N – число снарядов, R — радиус снаряда), получим

$$P_{отр}=P_{изл}\frac{\delta^4 N R^2 D_a^4}{6{,}4\,\lambda^2 r^4}\approx 10^9\cdot P_{изл}\left(\frac{D_a}{r}\right)^4 \qquad (4.1.22)$$

Мощность отражённого сигнала должна быть выше мощность шума в антенне. В радиодиапазоне более значим внутренний шум (формула 4.1.1). Чтобы прикинуть его мощность, примем коэффициент шумов равным $F = 1$. Температура, до которой практически можно охладить приёмник, по порядку величины не ниже 10 К. Ширина полосы приёма должна быть такой, чтобы в неё попадал отражённый сигнал с двукратно доплеровски смещённой частотой:

$$\Delta\nu = \nu_0\left(\frac{c+v}{c-v}-1\right) \approx 2\nu_0 = 2\cdot\frac{c}{1\,мм} = 6\cdot10^{11}\,Гц \qquad (4.1.23)$$

Это связано с тем, что Земля не знает достоверно, с какой скоростью приближаются снаряды, а значит, и на какой частоте вернётся сигнал; известен лишь верхний предел скорости, найденный из наблюдений тормозящего флота. Подставив эти значения в (4.1.1), получим $P_{внутр.шум} \sim 10^{-10}$ Вт. Тогда из условия обнаружения отражённого сигнала $P_{отр} > P_{внутр.шум}$ следует неравенство

$$r < 10^5 \cdot D_a P_{изл}^{1/4} \qquad (4.1.24)$$

Если мы хотим обнаружить радиолокацией снаряды на расстоянии порядка 100 а. е. ~ 10^{13} м, то мощность и диаметр антенны должны удовлетворять условию $P_{изл} D_a^4 > 10^{32}\,Вт\cdot м^4$. Так, антенна диаметром 1 км должна иметь мощность не менее 10^{20} ватт, для 10-километровой антенны достаточно 10^{16} Вт, и т. д. При этом, напомним, её необходимо поддерживать охлаждённой до 10 К выше абсолютного нуля. Исходя из более реалистичных (хотя всё равно грандиозных) параметров локатора D_a = 10 км, $P_{изл}$ = 100 МВт, получим дистанцию обнаружения порядка 10^{11} м или 1 а. е. Это мало. Итак, радиолокация явно не годится.

Рассмотрим возможность подсветить снаряды видимым светом. Лазеры оптического диапазона, в отличие от радиоантенн, могут выдавать очень короткие импульсы очень большой мощности. Так, установка из 192 лазеров в National Ignition Facility (США) производит синхронизированные импульсы длительностью несколько пикосекунд с суммарной пиковой мощностью 500 тераватт. На каком расстоянии можно увидеть отражение такой вспышки от снарядов?

Будем выражать оптическую яркость в звёздных величинах, как и в предыдущей главе. Формулы гл. 4.1.5 остаются в силе, но вместо звёздной величины Солнца (-26,78) нужно будет подставить звёздную величину лазерного излучателя, наблюдаемую с расстояния 1 а. е., а вместо $1+r$ (расстояние от Солнца до снарядов) подставить r. Найдём зависимость звёздной величины лазера от его мощности и угла расхождения пучка.

Если лазер излучает видимый свет мощностью P в пучке с углом расхождения θ, то на расстоянии r плотность потока световой энергии (Вт/м^2) равна $I = P/\pi(\theta r)^2$, а звёздная величина на расстоянии 1 а. е. $M_{лаз} = -26{,}78 + 2{,}5\log_{10}(P_{сол}/P_{лаз}) + 5\log_{10}\theta/2$, где $P_{сол}$ — мощность излучения Солнца в видимом диапазоне. Подставив $P_{сол} = 1{,}4 \cdot 10^{26}$ Вт, получим

$$M_{лаз} = 38{,}59 - 2{,}5\log_{10}P_{лаз} + 5\log_{10}\theta/2 \qquad (4.1.25)$$

Угол расхождения θ зависит от длины волны λ и радиуса светового пучка в его наиболее узком месте (beam waist) w_0. Для идеального (гауссова) пучка $\theta = \lambda/\pi w_0$, у высокоэнергичных импульсных лазеров эта величина в 30-40 раз больше. Будем далее считать, что $\theta = 10\lambda/w_0$. Возьмём длину волны 527 нм. Наименьший радиус пучка w_0 зависит от геометрии оптической полости лазера. Если последняя представляет собой трубу длиной d, ограниченную на торцах вогнутыми зеркалами радиусом кривизны $R >> d$, то наименьший радиус пучка находится по формуле

$$w_0^2 = \frac{d\lambda}{\pi}\left(\frac{R}{2d}\right)^{1/2} \qquad (4.1.26) \qquad \text{[Silfvast, p. 417]}$$

При «умеренных» габаритах лазера d = 10 м и R = 100 м наименьший радиус пучка w_0 = 2 мм, угол расхождения θ = 0,0027 рад, и звёздная величина лазера на расстоянии 1 а. е. при мощности 500 ТВт равна -12^m,49. Это очень мало, значительно слабее Солнца. Мощность лазера нужно увеличивать, а угол расхождения уменьшать.

Отдельный лазер в установке National Ignition Facility (NIF) производит импульс с пиковой мощностью 2,5 ТВт. Увеличим энергию накачки в 10 раз, а длительность импульса сократим в 10 000 раз, до порядка 1 фемтосекунды. (Такое возможно, но меньше, видимо, нельзя: фемтосекунда — это около одного периода светового колебания). Пиковая мощность импульса одного лазера возрастёт в 10^5 раз, до $2{,}5 \cdot 10^{17}$ Вт. Далее, ничто не мешает нарастить количество лазеров в установке (хотя с ростом их числа возрастают проблемы с охлаждением и маршрутизацией световых потоков). Пусть наш Супер-NIF включает в себя не 200, а 20 000 лазеров. Суммарная пиковая мощность возрастёт в 10 млн. раз, до $5 \cdot 10^{21}$ Вт. Не ограничимся этим и постараемся уменьшить угол расхождения. Удлиним оптическую полость каждого лазера до 100 м (это и неизбежно при наращивании энергии накачки). Радиус кривизны зеркал увеличим до 10 км. (Его нельзя увеличивать до бесконечности — нарастает нестабильность генерации импульса). Длину волны уменьшать не будем, т. к. короткие (ультрафиолетовые) волны плохо отражаются. Итак, минимальный радиус пучка удалось увеличить до 1 см, а угол расхождения уменьшить до $5 \cdot 10^{-4}$ рад.

Пиковая звёздная величина Супер-NIF на расстоянии 1 а. е. будет равна -33^m,67. Это уже значительно ярче Солнца, с этим можно работать. Подставив эту величину в соответствующие формулы предыдущей главы, найдем выражение для звёздной величины отдельного снаряда на расстоянии *r*:

$$M = 30^m{,}60 + 10\log_{10} r \qquad (4.1.27)$$

Итак, снаряд приобретёт звёздную величину 48^{m} (т. е. станет видимым для Гипер-Хаббла) на расстоянии 55 а. е. Очень хорошо! Реальное расстояние до Земли в момент обнаружения будет 26,5 а. е., и до удара останется 7 часов. Увеличить время упреждения, по-видимому, нет уже никакой технической возможности.

Подведём промежуточный итог. За несколько часов до удара по Земле снаряды обнаружить можно. Для этого необходимо периодически светить в их сторону импульсным лидаром, превосходящим по мощности в 10 млн. раз мощнейшую из существующих лазерных установок, и высматривать отражение в телескоп с диаметром зеркала в несколько километров, на пределе его видимости. Остаётся вопрос: насколько оправданы колоссальные затраты на такую систему обнаружения? Поможет ли она спасти Землю?

4.2. Можно ли уничтожить снаряды?

Итак, допустим, с помощью Супер-NIF и Гипер-Хаббла люди обнаружили снаряды на фактическом расстоянии 25 а. е. До удара остаётся не больше семи часов. Существует ли возможность за это время уничтожить рой?

4.2.1. Что означает «уничтожить»?

Допустим, нам удалось полностью испарить снаряд (пока не будем уточнять, каким способом). Что произойдёт с его остатками? Атомы пара продолжат движение к Земле практически с той же самой скоростью. Если взорвать снаряды слишком близко от Земли, то вся масса роя всё равно врежется в атмосферу и вызовет не менее катастрофические последствия, чем целые снаряды. Разрушение снаряда не затормозит его и не собьёт с курса. Чтобы изменить импульс снаряда, нужно столкнуть его со «щитом» сопоставимой массы, т. е. всего потребуется выставить на пути снарядов порядка 100 тыс. тонн. Причём каждый щит нужно прицельно подставить под конкретный снаряд, и всё это успеть за 7 часов. Это явно нереально.

К счастью, атомы пара всё же разлетаются в стороны из-за теплового движения. Поэтому снаряды нужно уничтожить как можно дальше от Земли. Тогда атомы пара успеют разлететься достаточно далеко, и в Землю врежется их незначительная доля.

Оценим её количественно. Пар углерода имеет температуру около 4200 К. Согласно распределению Максвелла, его поперечная скорость (проекция скорости на плоскость, перпендикулярную направлению полёта снаряда) — нормально распределённая случайная величина со средним значением 0 и среднеквадратичным отклонением $\sigma_v = \sqrt{2kT/m}$ = 2,4 км/с. Если снаряды испарились за время *t* до удара, атом успеет отклониться от линии полёта на расстояние $\sigma_d = \sigma_v t$. Для того, чтобы в Землю попало менее 5% массы снарядов, радиус Земли должен составлять менее 0,125 σ_d, откуда σ_d > 51,2 тыс. км, и время столкновения *t* = 6 часов до удара. Это предел возможностей Земли — как уже говорилось, обнаружить снаряды более чем за 7 часов нельзя.

Итак, если взрывать рой, то на расстоянии 22 а. е. от Земли. Какими способами можно это сделать?

4.2.2. Лазерный удар

Первое, что приходит в голову: использовать тот же Супер-NIF для уничтожения снарядов. Напомню его характеристики: пиковая мощность $P = 5\cdot10^{21}$ Вт, длительность импульса $\tau \sim 10^{-15}$ с, угол расхождения пучка $\theta = 5\cdot10^{-4}$ рад. В отдельном импульсе высвечивается энергия $P\tau \sim 5$ МДж. На расстоянии $r = 22$ а. е. она размазывается по площади $S'=\pi(r\theta)^2 = 8{,}5\cdot 10^{18}$ м^2, и на лобовую поверхность снаряда площадью $S = 20$ см^2 падает энергия $P\tau S/S' = 10^{-15}$ Дж. При удельной теплоте испарения графита около 30 МДж/кг понадобится $3\cdot 10^{19}$ вспышек, чтобы испарить 1 грамм массы снаряда... Итак, гигантская мощность нашей лазерной установки не должна вводить в заблуждение: как оружие против снарядов она ничего не стоит.

4.2.3. Прицельная стрельба

Как было показано в гл. 3.2.2, пылинка радиусом больше 100 мкм способна уничтожить снаряд. Что если расстрелять снаряды пылинками, точнее, выставить неподвижную пылинку на пути каждого снаряда?

Это невозможно. Даже Гипер-Хаббл не в состоянии разрешить отдельный снаряд, т. е. установить его точное местоположение. Предельная (обусловленная дифракцией) разрешающая способность Гипер-Хаббла порядка $\lambda / D_a \sim 10^{-10}$ рад. Снаряд диаметром 5 см будет иметь такой угловой диаметр на расстоянии 500 тыс. км, т. е. немногим дальше Луны. На расстоянии 22 а. е. его местоположение можно будет установить лишь с точностью до 300 метров, т. е. для гарантированного уничтожения перед каждым из 756 000 снарядов придётся выставлять не пылинку, а щит 300-метрового диаметра... Правда, снаряды можно разрешить интерферометрическим методом. Для этого необходимы два Гипер-Хаббла на расстоянии около 30 тыс. км друг от друга, причём это расстояние должно быть известно и выдержано с точностью в разы меньше длины волны (0,5 мкм). Но даже если установить координаты снаряда с точностью до сантиметра, остаётся вопрос: как поместить пылинку в нужное место с такой же точностью? Необходимо снабдить каждую пылинку двигателем, навигационным датчиком, развернуть плотную сеть маяков за орбитой Урана (позиционирование по пульсарам не даёт нужной точности)... Нет, идея явно утопична.

4.2.4. Пылевая бомба

Единственный разумный вариант — выставить на пути снарядов достаточно плотное пылевое облако. Рассмотрим его подробнее.

Вероятность столкновения снаряда с пылинкой на отрезке пути Δr равна $n\,S\,\Delta r$, где n — концентрация пылинок, S — лобовая площадь снаряда. Если общее количество пылинок N, то концентрация $n = N / V = N / (\Delta r\, S_O)$, где S_O – поперечное сечение облака. Подставляя в предыдущее выражение, получим, что вероятность столкновения $N\,S\,/\,S_O$. Для гарантированного уничтожения она должна быть больше единицы, отсюда получаем условие для количества пылинок на 1 снаряд: $N \geqslant S_O/S$. На весь рой оно должно быть, соответственно, в 756 000 раз больше.

Лобовая площадь роя S = 1500 м^2, а облако, чтобы прикрыть Землю от роя, чей радиус равен радиусу Земли, должно иметь сечение $S_O = \pi$ (6400 км)^2 = 3,6·10^{10} м^2. Итак, требуется рассеять на пути снарядов не меньше 2·10^{13} пылинок, каждую массой не меньше 10^{-8} г, всего 200 кг пыли. Пока что выглядит реалистично, даже если для надёжности поднять массу пыли до 2000 кг. (Правда, Земля не знает ни лобовой площади роя, ни массы отдельного снаряда. Значит, массу пылевого облака и размер отдельной пылинки придётся задавать наугад. Но подыграем землянам и будем считать, что они угадали точно).

Эта пыль должна быть рассеяна внутри сферы радиусом с Землю, причём за достаточно короткое время, например, 1 час. Наиболее естественный способ это сделать — взорвать бомбу со специальной оболочкой, которая при взрыве рассыпалась бы на пылинки нужного размера. Чтобы пылинка пролетела радиус Земли за час, ей нужно придать скорость около 2 км/с, т. е. кинетическую энергию 2·10^{-5} Дж. Облако в целом должно иметь кинетическую энергию 4·10^8 Дж, что соответствует 100 кг тротилового эквивалента. Получается, что защититься от снарядов до смешного легко? Достаточно взорвать на его пути небольшую, даже не ядерную бомбу-«дымовуху»?

Нет, не так уж легко.

Напомню, что бомбу нужно взрывать далеко от Земли, в 22 а. е. — за орбитой Урана. Невозможно постоянно держать бомбу наготове в нужной точке за 22 а. е. от Земли: она будет двигаться по орбите вокруг Солнца, а не висеть около линии Земля — Глизе 764.2. Невозможно и доставить её с Земли за несколько минут (и даже часов). Можно, правда, создать заградительный пояс из бомб вокруг всей Солнечной системы на расстоянии 22 а. е., так чтобы расстояние между соседними бомбами не превышало радиуса Земли. Для этого потребуется более 3 миллионов бомб, причём каждую придётся снабжать собственным лидаром и телескопом, т. к. команда на подрыв с Земли будет идти 3 часа... Всё это выглядит уже не слишком реалистично.

4.2.5. Пылевая стена

Но не будем сразу отбрасывать идею пылевой завесы. Рассмотрим другой вариант: не взрывать бомбу перед самым ударом, а заблаговременно создать кольцеобразную пылевую «стену» вокруг Солнечной системы на пути снарядов. Тогда не понадобится ни Супер-NIF, ни Гипер-Хаббл — снаряды будут уничтожены без участия человека. Единственный способ это сделать — найти какое-нибудь подходящее малое тело Солнечной системы и «распылить» его, так чтобы мелкие осколки растянулись вдоль орбиты.

Орбита пылинок защитного кольца должна лежать в одной плоскости с Солнцем и траекторией снарядов. Последняя наклонена к эклиптике под углом 7º, значит, орбита пылинок должна иметь примерно такое наклонение. Снаряды летят из точки с эклиптической долготой 294º, поэтому восходящий узел орбиты пылинок должен отставать от неё на 90º, т. е. иметь долготу около 204º. Небесные тела с такими элементами орбиты известны. Так, поиск по базе данных астероидов и комет НАСА выдаёт 21 тело с близкими параметрами. На расстоянии 23 а. е. такие тела представляют собой потенциальные ядра комет, состоящие из льда и пыли. Найдём такую комету и будем медленно греть, так чтобы она не взорвалась, распавшись на крупные осколки, а неторопливо испарялась, высвобождая изо льда вмороженные пылинки. Тогда вдоль орбиты кометы постепенно растянется искусственный метеорный поток — защитная пылевая стена от снарядов.

Может показаться, что потребуется непомерно много пыли, но это не так. «Высота» стены должна быть такова, чтобы прикрывать всю орбиту Земли, т. к. неизвестно, в какую именно точку орбиты нацелены снаряды. В проекции на плоскость, перпендикулярную траектории снарядов, орбита Земли выглядит как эллипс с малой полуосью 1 а. е. · sin 7º = 0,12 а. е. Таким образом, пылевая стена должна представлять собой тор большим радиусом 23 а. е. и малым радиусом 0,12 а. е. Сечение такого тора «вертикальной» плоскостью приблизительно равно 4 · 23 · 0,12 а. е.^{2} = 2,5·10^{23} м^2 = 2·10^9 поперечных сечений Земли. Как уже подсчитано, на каждое поперечное сечение Земли требуется не менее 200 кг пыли, итого — 4·10^{11} кг. Учитывая, что пыль составляет около 1/3 массы типичной кометы (остальное — лёд), необходимо распылить комету массой порядка 10^{12} кг, т. е. поперечником порядка 10 км. Это достаточно умеренные размеры, так что проблема «где взять пыль» не стоит.

Но есть и другие проблемы. Во-первых, время. Период обращения кометы с радиусом орбиты 23 а. е. равен 110 годам, а пыль будет растягиваться вдоль орбиты значительно дольше. Но с этим можно справиться, если распылять одновременно несколько комет с похожими орбитами. Во-вторых, энергия. На нагревание 1 кг льда с 70 К (температура на спутниках Урана) до 273 К требуется 276 кДж, а на его плавление 334 кДж. В итоге для полного расплавления 10-километровой кометы требуется энергия порядка 10^{18} Дж. Если растянуть процесс на 100 лет, то будет достаточно мощности около 300 мегаватт (это АЭС среднего размера).

Итак, идея пылевой стены, на первый взгляд фантасмогоричная, приобретает вполне реальные очертания. Похоже, что такой проект можно осуществить уже на завтрашнем технологическом уровне (так же как Супер-NIF и Гипер-Хаббл). А это значит, что посылать снаряды нет никакого смысла. Более слабая цивилизация закроется от них сравнительно легко... Или всё-таки нет?

4.2.6. Как пробить стену

К сожалению, одна очень простая контрмера позволит снарядам преодолеть пылевую защиту практически без потерь. Перед входом в Солнечную систему снаряд должен отстрелить «головку» длиной около 4 см (типичный пробег пылинки) и пустить её вперёд себя. Головка примет на себя удар первой пылинки защитной стены, испарится и, продолжая лететь вперёд сгустком раскалённого пара, будет расчищать пыль с пути основной массы снаряда.

С учётом этого варианта землянам придётся создать вторую пылевую стену. Причём достаточно далеко от первой, чтобы в промежутке испарившаяся головка успела рассеяться — допустим, не ближе 10 а. е. Но ничто не мешает снаряду отстрелить от себя и следующие 4 см. Полная длина снаряда, напомним, 40 м. Даже если земляне каким-то чудом это узнают, для гарантированного уничтожения 90% массы снаряда им придётся ставить 900 пылевых стен увеличивающегося радиуса, от 23 до 9023 а. е. Общая масса пыли в этих стенах составит $7{\cdot}10^{16}$ кг, что потребует распыления 180 тысяч 10-километровых комет. Даже если не говорить о времени, на плавку льда потребуется порядка 10^{23} Дж энергии, а это уже энергия метеорита-убийцы динозавров. Получается, что полноценная защита планеты обойдётся примерно в ту же энергетическую цену, что нападение. И, конечно, масштаб задачи — построить 900 пылевых стен вокруг Солнечной системы вплоть до облака Оорта менее чем за 100 лет — соответствует уже не завтрашнему, а в лучшем случае послезавтрашнему технологическому уровню...

Подведём неутешительный итог. На сегодняшнем уровне ни обнаружить, ни уничтожить снаряды нельзя. Современная Земля абсолютно беззащитна, она ничего даже не узнает о снарядах, пока они не врежутся в атмосферу. На завтрашнем уровне, то есть на том, где возможны Гипер-Хаббл и Супер-NIF, в лучшем случае можно выиграть несколько часов времени на то, чтобы укрыться в убежищах или эвакуировать с Земли нечто самое ценное. Цивилизация послезавтрашнего уровня способна закрыться от снарядов, но это обойдётся примерно в ту же энергетическую цену, как их разгон.

Литература

К. Ленг. Астрофизические формулы. Т. 1-2. М., 1978

Физические величины. Справочник. Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М., 1991

M. Rafelski, A. M. Wolfe, J. Cooke, Hsiao-Wen Chen, T. E. Armandroff, G. D. Wirth: Deep Keck u-band imaging of the Hubble Ultra Deep Field: A catalog of z~3 Lyman Break Galaxies // arXiv:0908.0343v3 [astro-ph.CO]

W. T. Silfvast: Laser Fundamentals. 2 ed. Cambridge, 2004