

«СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ» И ФОТОЭФФЕКТ (за страницами учебников)

А. Б. Рыбаков, ГБОУ Гимназия № 144, г. Санкт-Петербург

Тема статьи — различные значения термина «свободные электроны», распределение «свободных электронов металла» по энергии и их поведение при явлении фотоэмиссии.

1. О ПУТАНИЦЕ В ТЕРМИНАХ

Учебники в теме «Фотоэффект» ставят в центре внимания невозможность объяснения этого явления на основе волновой теории света и естественное, «непринуждённое» объяснение — на основе представления о квантах света. При этом за рамками изложения остается ряд непростых и интересных вопросов. Некоторые из них мы и намерены рассмотреть.

В некоторых учебных публикациях встречались утверждения, что при фотоэффекте из атомов металла выбиваются электроны. В одной из таких публикаций автор даже обосновывал свой вывод тем, что «свободные электроны не могут поглотить фотон».

Мы собираемся проанализировать ту терминологическую путаницу, которая привела к этому неправильному выводу. Дело в том, что в физике иногда в разных разделах одним и тем же термином называют совсем разные объекты.

Приведём пример. Что называется идеальным газом в термодинамике, все знают. Но тем же термином в газодинамике называют другой объект. Так называют газ, при анализе движения которого можно пренебречь вязкостью. И приходится как-то выпутываться из этой двусмысленности. Аналогичная ситуация сложилась и с термином «свободные электроны».

Что же касается роли «свободных электронов» в металлах, то необходимо иметь в виду, что строение металла на микроскопическом уровне, конечно, описывается на основе квантовой механики, так что *детальный* разговор на эту тему, по сути, невозможен.

Но осознание этого обстоятельства не должно лишать нас возможности качественного, по возможности простого, наглядного описания этих явлений.

Но прежде чем заняться фотоэффектом, рассмотрим другие ситуации, при описании которых используется термин «свободный электрон».

2. О СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Рассмотрим столкновение электрона с фотоном. Электрон будем считать *свободным*, т. е. не взаимо-

действующим больше ни с каким другим телом. В частности, это значит, что электрон движется в вакууме (а не в веществе).

Докажем, что в результате такого столкновения не может произойти поглощение фотона электроном.

Мы предложим очень простой способ рассуждения, который позволит обойтись вообще без всяких выкладок.

При столкновении двух частиц должны выполняться законы сохранения импульса и энергии, т. е. четыре скалярных уравнения (поскольку векторное уравнение, выражающее закон сохранения импульса, эквивалентно трем скалярным уравнениям). Но в конечном состоянии системы мы имеем только свободный электрон, его параметры полностью задаются *тремя* (!) скалярными величинами — проекциями импульса. То есть мы имеем четыре уравнения с тремя неизвестными. Эта математическая несуразность и показывает невозможность данного процесса. Можно сказать и так: варьируя три переменных, невозможно удовлетворить четырем уравнениям.

В этом рассуждении важно, что электрон — бесструктурная частица, т. е. у него нет внутренней энергии, которая могла бы измениться в этом процессе. Если бы на месте электрона была какая-то структурная частица, например атом, то мы имели бы 4-ю переменную — изменение внутренней энергии атома. И законы сохранения привели бы нас в этом случае к 4 уравнениям с 4 неизвестными, т. е. к корректной математической задаче.

Приведём пример процесса с участием свободного электрона.

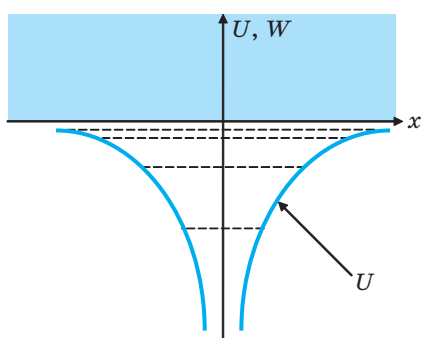
Мы знаем, что частица может аннигилировать со своей античастицей, например, электрон с позитроном. Пусть речь идет о столкновении *свободных* электрона и позитрона. Может ли в таком процессе образоваться фотон? Именно один фотон. Вопреки тому, что об этом думают авторы некоторых пособий, — нет, не может. Это легко доказывается при помощи рассуждений, аналогичных приведенным выше. Но, заметим, возможна и аннигиляция с образованием двух фотонов.

Однако если столкновение электрона с позитроном происходит, например, в поле какого-то ядра (т. е. они уже не являются свободными), то аннигиляция с образованием одного фотона вполне возможна.

3. ОБ ЭЛЕКТРОНАХ В АТОМАХ

Теперь пусть речь идет о движении электрона в атоме. Напомним некоторые моменты, которые нам понадобятся в дальнейшем. Для простоты изложения будем говорить об атомах с одним валентным электроном.

Валентный электрон движется в кулоновском поле атомного остова (ядра и остальных электронов). Проиллюстрируем эту ситуацию на рисунке. Проведём через атом ось x . Пусть ядро расположено в точке $x = 0$. На рисунке показан ход потенциальной энергии электрона U как функция расстояния электрона от ядра. При этом, как обычно, принято, что $U \rightarrow 0$ при $x \rightarrow \infty$. Тогда $U < 0$ при любом конечном x . Пунктирные кривые указывают возможные значения полной энергии электрона W .



Полная энергия электрона W складывается из потенциальной U и кинетической K :

$$W = U + K,$$

она остается постоянной при движении электрона. Если полная энергия электрона $W < 0$, то существует такая точка x' , при которой $W = U(x')$. Ясно, что координате $x > x'$ соответствовало бы отрицательное значение кинетической энергии, чего быть не может, следовательно, при $W < 0$ электрон во время движения остается в ограниченной области пространства. Такой электрон называют *связанным*. Наоборот, при $W > 0$ и при любом значении координаты x имеем $K > 0$ и электрон может удалиться на любое расстояние от ядра. Движение электрона в *потенциальной яме* (т. е. при $W < 0$) квантовано (т. е. W может принимать лишь дискретные значения). Электрон же с полной энергией $W > 0$ называют *свободным*. Но здесь этот термин значит совсем не то, что выше, в п. 2. Электрон, который мы здесь называем *свободным*, «чувствует» поле атомного остова (т. е. иона). Существенно, что движение этого электрона не квантуется — его полная энергия может принимать любые значения.

Можно провести аналогию с движением небесных тел в Солнечной системе. У какого-нибудь зонда, прилетевшего из другой планетной системы, $W > 0$, и он снова уйдет от Солнца на «бесконечное» расстояние. А у планет и астероидов $W < 0$ — они не могут разорвать притяжение Солнца. Но, конечно,

в классической механике никакого квантования нет. Впрочем, орбиты планет все-таки почему-то «квантованы» (вспомните правило Тициуса — Боде) — это одна из загадок небесной механики.

Вернёмся к электрону в атоме. В научных статьях иногда используется и такая терминология: о связанном электроны говорят как об «электроне в дискретном спектре», а о свободном — как об «электроне в непрерывном спектре».

Атом, конечно, может поглотить фотон. При этом атомный электрон перескакивает на уровень с большей энергией (если полная энергия в конечном состоянии $W_k < 0$, то такой процесс называется *фотовозбуждением*, а если $W_k > 0$, то — *фотоионизацией*).

Для дальнейшего изложения важно, что утверждение о возможности связанного электрона поглотить фотон остается справедливым для потенциальной ямы любого профиля (не только кулоновского).

4. ОБ ЭЛЕКТРОНАХ В МЕТАЛЛЕ

Теперь, наконец, обратимся к электронам в металле.

В металле потенциальные кривые соседних атомов перекрываются, при этом валентные электроны теряют связь со «своим» атомом и приобретают возможность двигаться по всему объёму металла. Такие электроны называются «свободными электронами металла» (чтобы избежать путаницы, придётся здесь выписывать этот термин полностью и в кавычках), другое их название — электроны проводимости. Несмотря на свое название, эти электроны не свободны! Мы знаем, что вблизи поверхности металла существует потенциальный барьер, удерживающий эти электроны в нем. Так что они тоже находятся в потенциальной яме, или, как иногда говорят, в «потенциальном ящике». Итак, они связаны, «заперты» в металле, а связанным электронам, как мы уже знаем, законы сохранения не запрещают поглотить фотон, что и происходит при фотоэффекте.

Повторим, что недопустимо смешивать два очень похожих термина:

- свободные электроны (о которых мы говорили в п. 2 и которых в металле нет);
- «свободные электроны металла» (которые совсем не свободны).

Обратим внимание читателей на то обстоятельство, что слово внутри составного термина обычно теряет свое прямое, словарное значение. Каждый понимает смысл и слова «государь», и слова «милостивый». Но в составном «термине», который наши прадеды использовали для обращения: «Милостивый государь!» — эти слова значат нечто совсем другое. Для тех читателей, которым этот образец

покажется несерьёзным, приведём физический пример. Каждый знает, что такое импульс. Но внутри составного термина «импульс силы» это слово теряет свое исходное значение. Так же и термин «свободные электроны», попав в состав более сложного термина, меняет свое значение.

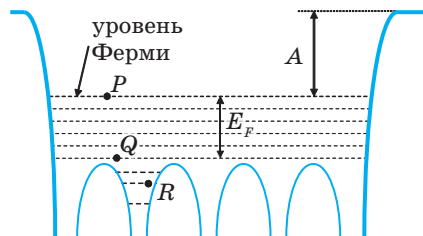
Вернемся к электронам в металле. В учебных целях, если нет желания касаться сложных моментов, можно ограничиться сказанным выше и констатировать, что глубина потенциального ящика, в котором расположены «свободные электроны металла», и есть работа выхода A . Но, строго говоря, это совсем не так.

5. ОБ ЭНЕРГИИ ФЕРМИ

Когда Солнце потухнет и Земля остынет (впрочем, возможно и другое развитие событий), вся атмосфера сконденсируется — все молекулы атмосферы лягут на поверхность планеты тонким слоем. Но если металл охладить до температуры абсолютного нуля, электроны не «лягут тонким слоем» на дно потенциального ящика. Дело в том, что электроны подчиняются законам квантовой механики, и эти законы (принципиальная неразличимость электронов и принцип Паули) не позволят всем электронам оказаться в состоянии с *одной энергией*. Поэтому даже при $T = 0$ электроны займут множество уровней *на дне* потенциального ящика. Самый верхний из этих уровней называется *уровнем Фер-*

ми, а энергия электронов на этом уровне — *энергией Ферми* E_F .

Поясним сказанное рисунком. По вертикальной оси, как и прежде, откладывается полная энергия электронов. Штриховые прямые показывают уровни энергии «свободных электронов металла» (и связанного электрона в одном из атомов).



Итак, при $T = 0$ самой большой будет энергия у «свободных электронов металла» на уровне Ферми. Нагревание металла до температур порядка сотен K очень слабо изменит этот вывод (лишь малая доля всех электронов будет иметь энергию, слегка превышающую E_F). Дело в том, что величина E_F составляет для разных металлов несколько эВ, энергия же электронов при указанных температурах — порядка сотых долей эВ.

Работа выхода A (как всем хорошо известно) — это минимальная энергия, которую надо сообщить электрону, чтобы «вытащить» его из металла. И теперь мы понимаем, что минимальна эта энергия будет для электронов на уровне Ферми.

ВСЁ ДЛЯ УЧИТЕЛЯ

Издательская группа ОСНОВА

Оформите подписку на 2012 г.

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении по одному из двух каталогов: «Роспечать» или «Почта России». Для этого проще использовать квитанцию, размещённую на обороте. Вы также можете оформить редакционную или электронную подписку со скидкой. Подробности по тел. **(495) 66-432-11** или на сайте www.e-osnova.ru

46394		35579		79362	
подписной индекс «Роспечать»		подписной индекс «Почта России»		электронная версия «Почта России»	

1 месяц		3 месяца			6 месяцев		
на почте	на почте	через редакцию	электронная версия*	на почте	через редакцию	электронная версия*	
98,33 руб.	294,99 руб.	265,49 руб.	199,50 руб.	589,98 руб.	530,98 руб.	399,00 руб.	
Комплект (15 изданий со скидкой 15 %). Подписной индекс: «Роспечать» — 46397, «Почта России» — 35791							
на почте	на почте			на почте	через редакцию	электронная версия*	
1252,50 руб.	3757,50 руб.	—		7515,00 руб.	6750,00 руб.	5085,00 руб.	

*Электронная версия — полностью идентична печатному изданию. Статьи открываются в формате .pdf, их можно сохранить на своём компьютере или распечатать.
 Адрес издательства: 125222 Москва, а/я 8, «ИГ «Основа», тел. (495) 66-432-11, e-mail: info@e-osnova.ru, сайт: www.e-osnova.ru

Ясно, что детальный анализ любого явления электронной эмиссии из металла потребует обращения к описанной здесь картине распределения электронов по энергии.

Чтобы перебросить мяч через стену высотой h , надо сообщить мячу у земли вертикальную скорость v_y , величину которой можно найти из условия

$$\frac{mv_y^2}{2} \geq mgh.$$

Аналогично электрон, подошедший изнутри к границе металла, сможет выйти наружу, если имеет нормальную компоненту скорости v_n^2 , удовлетворяющую условию

$$\frac{mv_n^2}{2} \geq A.$$

Сообщать электронам необходимую для этого энергию можно различными способами, и соответственно мы имеем различные виды электронной эмиссии из металлов. В школьном курсе уделяют особое внимание фотоэмиссии и лишь упоминают о термоэмиссии. Вот к фотоэмиссии (или *внешнему фотоэффекту*) и перейдём.

6. О НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ

Но сначала — несколько беглых исторических замечаний.

К началу 1920-х годов отсутствие имени А. Эйнштейна в списке нобелевских лауреатов становилось неприличным. И вот в 1922 г. А. Эйнштейн получает Нобелевскую премию за 1921 г. (именно так, поскольку в 1921 г. премия не присуждалась). Причем получает отнюдь не за свое «главное детище» (теорию относительности), с которым обычно связывается его имя в массовом сознании. В решении Королевской шведской академии было сказано, что премия присуждается А. Эйнштейну «за его вклад в теоретическую физику, и в особенности за открытие закона фотоэлектрического эффекта».

Учебники обычно пишут, что «Эйнштейн создал теорию фотоэффекта». Представляется, что это не совсем правильно. Запись закона сохранения энергии для какого-либо явления — это еще не теория этого явления. И здесь нет никакого принижения роли А. Эйнштейна. Ведь его работа и не была посвящена именно фотоэффекту. А. Эйнштейн занимался *более фундаментальными* вопросами. Приведём полностью название знаменитой статьи — «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света». Суть этой работы А. Эйнштейна — во введении понятия «квант электромагнитной энергии». А фотоэффект был лишь одним из примеров, на котором А. Эйнштейн показывал, как работают новые представления. И хотя уравнение Эйнштейна позволило объяснить «три закона фотоэффекта», но за рамками

Федеральное государственное унитарное предприятие «Почта России» ФСП - 1
Бланк заказа периодических изданий

АБОНЕМЕНТ На газету-журнал (индекс издания)

Физика. Всё для учителя! (наименование издания) Количество комплектов

На 2012 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда (почтовый индекс) (адрес)

Кому линия отреза

<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА (индекс издания)

На газету-журнал Физика. Всё для учителя! (наименование издания)

Стоимость	подписки	руб.	коп.	Кол-во комплектов
	каталожная	руб.	коп.	
	переадресовки	руб.	коп.	

На 2012 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

город
 село
 область
 почтовый индекс
 район
 код улицы
 улица
 дом корпус квартира
 Ф. И. О. _____



46394 ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС



35579 ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС

подписной индекс
электронной
версии по каталогу
«Почта России»
79362

этого уравнения остается огромное число вопросов, на которые оно не отвечает.

К 1905 г. уже сформировались представления о «свободных электронах металла» (решающую роль здесь сыграла работа П. Друде). Но в том-то и дело, что А. Эйнштейна полная картина фотоэмиссии совсем не интересовала.

Представления же о распределении «свободных электронов металла» по энергии (на которых должна основываться полноценная теория) были развиты намного позже появления работы А. Эйнштейна — только во второй половине 1920-х годов.

7. О ФОТОЭФФЕКТЕ

Теперь у нас есть возможность уточнить некоторые детали этого явления.

В приборах, использующих фотоэффект (ниже — ФЭ), происходит преобразование энергии света в электрические сигналы.

Для характеристики эффективности этого преобразования вводят понятие *квантовый выход* — это отношение числа вылетевших фотоэлектронов к числу поглощённых квантов. Для металлов эта величина, увы, крайне мала.

Попытаемся разобраться в причинах этого.

Ученики обычно, не задумываясь, повторяют вслед за учебником, что фотон «выбивает» или «вырывает» электрон из металла. Хоть бы кто-нибудь сказал: «Я не понимаю! Мне-то кажется, что он «вбивает» электрон в металл». И в самом деле — ведь фотон-то сообщает электрону импульс, направленный вглубь металла!

Итак, электрон поглотил квант света и приобрёл энергию $h\nu$. Что же будет происходить с этим *быстрым* электроном дальше? Он будет сталкиваться со всем, что попадётся ему на пути. А попадутся ему ионы (в узлах кристаллической решётки) и другие свободные электроны. Как именно быстрый электрон будет тратить свою энергию, сталкиваясь с ними?

Интересующие нас здесь закономерности вполне могут быть выявлены в совсем простой задаче, вполне доступной даже ученикам 9-го класса. Необходимо рассчитать, что произойдёт при лобовом упругом столкновении какой-то частицы с покоящейся частицей другой массы. Для этого нужно записать законы сохранения энергии и импульса для этой системы тел и решить получившуюся систему уравнений. Напомним результаты: оказывается, что налетающая частица теряет заметную долю своей энергии, только если частицы близки по массам. Так, теннисный мячик, столкнувшись с пушечным ядром, отлетит практически с той же энергией (но изменит направление своего импульса). Точно так же при столкновении свободного электрона с ионом энергия иону практически не передаётся из-за большого различия масс (это слишком упрощён-

ная трактовка взаимодействия электронов с кристаллической решёткой, но ограничимся этим).

При столкновении же тел, близких по массе, обмен энергиями, наоборот, проходит очень эффективно. Так, мячик, столкнувшийся «лоб в лоб» с таким же по массе покоящимся мячиком, отдаст ему всю свою энергию и остановится.

Итак, мы выяснили, что электрон, поглотивший фотон, будет растрчивать полученную энергию именно при столкновениях со своими собратьями. Заметим еще, что после одного-двух столкновений этот электрон «забывает» направление полученного от фотона импульса и в дальнейшем будет диффундировать с равной вероятностью во все стороны. Понятно, что около половины электронов, поглотивших фотоны, в конце концов, окажется у поверхности. Но даже если полученная от фотона энергия $h\nu$ была заметно больше работы выхода A , только очень небольшая доля таких электронов будет иметь достаточное для выхода наружу значение V_n . Большинство же, увы, растратят свою энергию при путешествии внутри металла.

В уравнении Эйнштейна для фотоэффекта одно из слагаемых — это максимальная кинетическая энергия вылетевших электронов. У каких же электронов кинетическая энергия максимальна? Что это за электроны? Каково их происхождение?

Обратимся снова к рисунку, иллюстрирующему возможные значения энергий электронов в металле. Буквами P , Q и R там помечены соответственно «свободные электроны металла» на уровне Ферми, их собратья на дне потенциальной ямы и атомные электроны.

Легко видеть, что уравнение Эйнштейна соответствует тому идеальному случаю, когда электрон на уровне Ферми, поглотив квант, тратит энергию лишь на преодоление потенциального барьера и больше ни на что.

Так что говорить в связи с уравнением Эйнштейна о выбивании атомных электронов совершенно невозможно!

Но все-таки может ли попавший в металл фотон поглотиться атомным электроном? Конечно, может.

Но чтобы выбраться за пределы металла, этому электрону придётся потратить часть полученной энергии на то, чтобы сначала вырваться за пределы своего атома, и лишь потом (если хватит энергии) — за пределы металла.

А хватит ли ему энергии?

Ответ зависит от конкретных значений различных параметров в интересующей нас ситуации. Прежде всего, от значений работы выхода A , энергии Ферми E_F , энергии ионизации атома внутри металла (этот атом, скорее всего, уже однократно ионизован) и спектрального состава падающего на металл света.

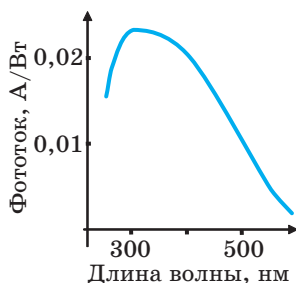
Если говорить о фотоэффекте в самом общем плане, то можно говорить и о явлениях, происходящих при падении на металл фотонов с очень большой энергией (например, при облучении металла рентгеновскими лучами). Тогда, конечно, среди вылетевших электронов будут и электроны, выбитые даже с внутренних оболочек атомов тяжёлых металлов.

Но для приложений наиболее интересны фотоэмиссионные катоды, работающие с видимым светом (или хотя бы с ближним ультрафиолетом). Напомним, что максимальная энергия кванта видимого света — около 3,1 эВ. Только у щелочных металлов работа выхода меньше этого значения.

Теперь мы понимаем, по каким причинам фотокатоды из чистых металлов практически не используются. И квантовый выход, и значения длины волны $\lambda_{кр}$, соответствующей красной границе ФЭ, малы. Отметим также, что немалая часть светового потока отражается от поверхности металла. Со всеми этими недостатками борются, создавая различного рода пленки на поверхности фотокатодов.

8. О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ФОТОЭФФЕКТА

На практике эффективность фотокатода часто характеризуют *кривой чувствительности*, в которой по одной оси откладывают длину волны падающего света, а по другой — фототок в расчёте на единицу мощности поглощенного



излучения. Такая кривая для сурьмяно-цезиевого фотокатода приведена на рисунке.

Упражнение

Найдите квантовый выход этого фотокатода в максимуме чувствительности.

На приведенном графике мы видим, что ток имеет резко выраженный максимум для определённого спектрального участка и резко спадает по обе стороны от него. Такого рода зависимости обнаружены и для многих чистых металлов. Поэтому говорят об определённой *избирательности* (или *селективности*) ФЭ.

Были обнаружены и другие очень интересные закономерности ФЭ: так, оказалось, что фототок сильно зависит от угла падения и поляризации падающего света.

В настоящее время общепринято, что указанные закономерности свидетельствуют о проявлении волновых свойств света в ФЭ.

Так что все просто только в школьных учебниках.

Взаимодействие света с веществом — очень сложное явление. Учебник же укладывает поведение света в прокрустово ложе: или фотон, или волна, — отделяя явления, в которых свет демонстрирует квантовые свойства, от тех, в которых проявляются его волновые свойства. Действительность намного сложнее.

Ответ к упражнению. Можно видеть, что максимум кривой лежит около $\lambda = 320$ нм, а фототок в максимуме равен примерно 0,023 А/Вт. Дальнейший расчёт несложен, причем квантовый выход данного фотокатода составляет около 9 %.

НОВОСТИ

А
У
К
И
И
Т
Е
Х
Н
И
К
И

ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ ПО НЕЙТРИННОМУ ЛУЧУ ВОЗМОЖНА. ДОКАЗАНО ОПЫТОМ

Физики Фермилаба (Национальная лаборатория ускорителей им. Ферми), проверяя новые возможности своего нейтринного детектора MINERvA, воспользовались им в качестве части нейтринного телеграфа и передали с ускорительного источника этих загадочных частиц, передатчика NuMI beamline, через 210 метров скальной толщи слово «нейтрино», которое было благополучно прочитано. Таким образом, в мире заработал самый настоящий нейтринный телеграф.

Нейтринный телеграф — удивительная вещь. Благодаря тому, что его носители, практически безмассовые частицы нейтрино, могут, в отличие от радиоволн, проникать всюду и почти не взаимодействуют с обычной материей, он мог бы осуществлять связь с прием-

никами, находящимися глубоко под землей, в скале или на невообразимой глубине океана. Однако явно не сейчас.

Дело в том, что передатчиком модулированных нейтрино может быть только сложная ускорительная система, а приемником — детектор, который не спрячешь в карман. Он сверхмассивен. Так, MINERvA — это 170 тонн свинца, углерода, железа, гелия, воды и пластика. Вода будет улавливать некоторые нейтрино из пучка, генерируемого ускорителем, и, чтобы из них можно было сложить слово, понадобится очень высокая интенсивность пучка. Именно это и проверялось физиками — насколько эффективно ловит нейтрино переоборудованный детектор. К тому же вряд ли кому-то, кроме самих физиков, покажется удовлетворительной скорости передачи информации, достигнутая сегодня, — 0,1 бита в секунду. Чтобы передать через скалу восемь букв слова «нейтрино», исследователям понадобилось два часа.

По материалам сайта <http://rnd.cnews.ru>