

<https://www.youtube.com/watch?v=SDtAh9IwG-I>

How big is a visible photon?

Jak velký je viditelný foton?

82 259 zhlédnutí

5. 7. 2021

Přepis

(přidám jen několik svých postřehů a názorů)

(01)- Hi Everyone! Have you ever wondered about how big a photon of visible light is? It must be smaller than the pupil in your eye, right? In fact, it should be small enough to fit through a 1 micron slit. Yet, it should also be big enough to completely cover two slits, that are spaced more than a thousand microns apart. So, I guess, answering this question is not going to be a trivial thing. In the past, I always used to think of a photon as something really tiny, like a little electromagnetic wave traveling through space at incredible speed. But in the last few years, my views have changed. And in this video, I will discuss why that is. So, if you Google for information about the size of a photon you will not find one definitive answer. It seems everybody has their own opinion about this subject, or even about how size should be defined. Some say that, because a photon is massless, it does by definition not have size because it does not occupy space like a physical object. But you can also define size as the “distance” or “volume” over which something interacts with its surroundings or even with itself. And if that’s your definition, then photons definitely have size. Now, in school I was taught that a photon is the smallest amount of energy that can be present in light of a particular wavelength. So, photons do have wavelength and for visible photons that wavelength is generally in the order of half a micron. But wavelength is not the same as size. For humans, size is important, I guess. If you buy a new car, you better make sure it’s the right size for your family and your garage. And so, if you see that a lens can focus light to a spot smaller than a micron, it is tempting to think that a single photon should be smaller than the spot, right; because light is made of photons. Well, things may not be that simple. For one: is that spot size really 1 μm , or is it actually much bigger? One of the most fascinating properties of light is indeed its wavelength. If you look carefully, light constantly reminds us that it must have one. As soon as we create a disturbance in the path of the light, we can observe this phenomenon called interference. A very famous example where we can observe interference is of course the double slit experiment, where the “disturbance” in the path of the light is a mask with two narrow slits. So here the light can only go along two well defined paths. And the result is that we observe these areas of higher and lower intensities behind the slits. And these areas are where the light waves are either in phase or out of phase. Now, this is just one example: we can also create interference by for example recombining the light of a source and its mirror reflection. Or we can even manipulate the interference very cleverly by using a Fresnel zone plate pattern. Interference is caused by the fact that light is an electromagnetic wave or field. And this is the way that you generally see alternating electromagnetic fields visualized: as a wave travelling along a narrow line. Now,

looking at this kind of depiction, you should ask yourself a few questions. The picture suggests that the perpendicular magnetic and electric fields indicate the field strength at the direction of propagation. But it also suggests that the field travels along a very narrow line. But this is obviously not correct. If only, because magnetic field lines are always closed loops and extend into space quite a bit, actually quite a bit more than is shown in this picture. And since the electric- and magnetic fields are always directly related, we know that the same is true for the electric field. So even an electromagnetic field with the lowest possible energy, which we refer might refer to as a single photon, can never be this localized entity travelling along a very narrow line. Instead, it must be something widely distributed in space. On the other hand, if we try to detect light, we find that the detection events themselves are very localized as well as quantized in energy. We can only detect the field of the light by removing discrete amounts of energy from the field, and when we do this, the process occurs very locally.

.....

(01) - Ahoj všichni! Přemýšleli jste někdy o tom, jak velký je foton viditelného světla? Musí být menší než zornice ve vašem oku, že? Ve skutečnosti by měl být dostatečně malý, aby se vešel do 1 mikronové štěrbin. Přesto by měl být také dostatečně velký, aby zcela zakryl dvě štěrbin, které jsou od sebe vzdáleny více než tisíc mikronů. Myslím, že odpověď na tuto otázku nebude triviální věc. V minulosti jsem si vždycky představoval foton jako něco opravdu malého, jako malou elektromagnetickou vlnu cestující vesmírem neuvěřitelnou rychlostí. Ale v posledních několika letech se moje názory změnily. A v tomto videu budu diskutovat o tom, proč tomu tak je. Pokud tedy na Googlu získáte informace o velikosti fotonu, nenajdete jednu definitivní odpověď. Zdá se, že každý má svůj vlastní názor na toto téma, nebo dokonce na to, jak by měla být definována velikost. **Někteří říkají, že protože foton je nehmotný, podle definice nemá velikost, protože nezabírá prostor jako fyzický objekt.** Můžete ale také definovat velikost jako „vzdálenost“ nebo „objem“, přes který něco interaguje s okolím nebo dokonce se sebou samým. A pokud je to vaše definice, **pak fotony rozhodně mají velikost.** http://www.hypothesis-of-universe.com/docs/eg/eg_045.pdf Nyní ve škole mě učili, že foton je nejmenší množství energie, které může být přítomno ve světle konkrétní vlnové délky. Fotony tedy mají vlnovou délku a pro viditelné fotony je tato vlnová délka obvykle řádově půl mikronu. **Ale vlnová délka není stejná jako velikost.** Pro lidi je myslím důležitá velikost. Pokud si koupíte nové auto, ujistěte se, že má správnou velikost pro vaši rodinu a vaši garáž. A tak, pokud vidíte, že čočka dokáže zaostřit světlo na místo menší než mikron, je lákavé si myslet, že jeden foton by měl být menší než místo, že; protože světlo je tvořeno fotony. No, věci nemusí být tak jednoduché. http://www.hypothesis-of-universe.com/docs/eg/eg_056.pdf Za prvé: je tato velikost místa opravdu 1 um, nebo je ve skutečnosti mnohem větší? Jednou z nejvíce fascinujících vlastností světla je jeho vlnová délka. Pokud se podíváte pozorně, světlo nám neustále připomíná, že takové musí mít. Jakmile vytvoříme narušení dráhy světla, můžeme pozorovat tento jev zvaný interference. Velmi slavným příkladem, kde můžeme pozorovat rušení, je samozřejmě experiment s dvojitou štěrbinou, kde „narušení“ v cestě světla je maska se dvěma úzkými štěrbinami. Tady tedy světlo může jít pouze dvěma dobře definovanými cestami. A výsledkem je, že pozorujeme tyto oblasti vyšší a nižší intenzity za štěrbinami. A v těchto oblastech jsou světelné vlny buď ve fázi, nebo mimo fázi. Toto je jen jeden příklad: interferenci můžeme vytvořit také například rekombinací světla zdroje a jeho zrcadlového odrazu. Nebo můžeme dokonce manipulovat s interferencí velmi chytře pomocí vzoru desek Fresnelovy zóny. Rušení je způsobeno skutečností, že světlo je elektromagnetická vlna nebo pole. A tímto způsobem obecně vidíte vizualizovaná střídavá elektromagnetická pole: jako vlna pohybující se po úzké čáře. Při pohledu na tento druh zobrazení byste si měli položit několik otázek.

Obrázek naznačuje, že kolmé magnetické a elektrické pole indikuje intenzitu pole ve směru šíření. Ale také to naznačuje, že pole se pohybuje po velmi úzké linii. Ale to samozřejmě není správné. Jenom proto, že **čáry na papíře** magnetického pole jsou vždy uzavřené smyčky **ale „čáry“ v realitě, např. kolem magnetu, z čehože jsou ???, z čeho je „pole“ ? (Domnívám se, že to bude „lokální křivý stav“ jenž použil dimenze časoprostoru, kde ta „lokality pole“ doslova „plave“ v základní nekřivé 3+3D časoprostorové mřížce-předu-síti) a zasahují do matematického ?** prostoru docela dost, ve skutečnosti **do fyzikálního prostoru** o dost víc, než je znázorněno na tomto obrázku. A protože elektrická a magnetická pole vždy přímo souvisejí, víme, že totéž platí pro elektrické pole. Takže ani **elektromagnetické pole s nejnižší možnou energií, které označujeme jako jediný foton**, nikdy nemůže být touto **lokalizovanou entitou** pohybující se po velmi úzké linii. **Zopakuj si tu slova vědce : Foton je lokalizovanou entitou „vyříznutou“ z pole elektromagnetického....a má-li energii, musí to být „balíček“ vyrobený z křivých dimenzí. Tady mám zajímavý názor → http://www.hypothesis-of-universe.com/docs/eh/eh_076.pdf** Místo toho to musí být něco široce distribuovaného ve vesmíru. Na druhou stranu, pokud se pokusíme detekovat světlo, zjistíme, že samotné detekční události jsou velmi lokalizované i kvantované v energii. Můžeme detekovat pouze pole světla odstraněním diskrétního množství energie z pole, a když to uděláme, proces probíhá velmi lokálně. http://www.hypothesis-of-universe.com/docs/eb/eb_056.jpg

.....

(02)- For example, it can happen when a photon is absorbed in one particular pixel of a CCD sensor. Or should I say in one particular atom in a pixel of a CCD-sensor. So, this is where things get a bit weird: on the one hand, we know that the field representing a photon is distributed in space. But when we try to detect it, we can only do so very locally. And we might ask ourselves: what do mean exactly with the term photon: does it refer to the field or part of the field itself, or do we refer mostly to the processes of transferring energy to and from the field? And now that we are asking ourselves all these questions, how long is the electromagnetic wave of a photon? Is it like 1 wavelength, or approximately 2.5 like is shown here, or maybe a few thousand wavelengths? As I said earlier, my views on what photons are, have changed quite a bit in the last few years. In fact, there was this one experiment I did in October 2020 that really got me thinking. I showed this experiment earlier, as a side note at the end of a previous video. So, what I build was a modified version of the double slit experiment. And the modification I made was that I had split the path leading to the slits into two spatially separated paths. Each of these paths leads to only 1 particular slit and both paths have a different length. In fact, I made the longest path about 40 mm longer than the shortest path. And even though 40mm may not sound like much, this distance is equivalent to more than 75000 wavelengths of the laser light I used. Now, when I brought down the beam power to “single photon” level, I did not really know what to expect. But it turned out, the experiment still showed very clear interference, even with this additional path difference present. So, the experiment suggested that, not only can a single photon simultaneously take paths that are spatially separated over a substantial distance, but it also allows these paths to have a very significant difference in length. If you were used to visualize a photon as being this little local electromagnetic wave, like I used to do, this experiment burns a hole in your brain. Because it shows that the interference properties of single photons extend over amazingly long distances in space. And at that point I realized that my ideas about the photon were completely inadequate. And there were several people, that told me the outcome of my experiment had to be wrong. Of course, without offering any particular insights on why. Personally, I am convinced that the result of the experiment is correct, but I now also think that the explanation I gave for the behavior is flat-out wrong. So, we are going to do this experiment again but now stretch that difference in path length a bit further and see what

happens. Will there be interference, no matter how long we make that second path, or will at some point maybe the interference just go away? Let me just walk you through the schematic: a HeNe-laser produces a beam of coherent monochromatic light. The intensity of this beam is then attenuated to single photon intensity levels with a series of gray filters. Later in this video, I will discuss how that was done. Next, there is a beam splitter that creates 2 different paths for the light. The short path leads directly to a detector, while passing a second beam splitter. The other path takes the beam on a little sightseeing tour and eventually brings the light back to recombine with the light from the of the first path. As you can see, the long path is about 5 times as long as the short path. After the light of the two paths is recombined, it is detected here in a camera where we can look at the interference. Let me show you around the actual setup. Here is the HeNe-laser, a golden oldie which was produced in December 1979. At its last calibration, it was generating $< 1\text{mW}$. But wait, does it say in 1985? Now even though this laser has matured as gracefully as I have in the last 35 years, it has lost quite a lot of its mojo. Because now, it only produces about 0.3mW . But all the better actually, because we don't need a lot of light for this experiment. Next in the setup there is a mirror under 45 degrees that is used to control the beam direction,

.....

(02)- Může se například stát, když je foton absorbován v jednom konkrétním pixelu snímače CCD. Nebo bych měl říci v jednom konkrétním atomu v pixelu CCD snímače. Tady se tedy věci stávají trochu divnými : na jedné straně víme, že pole představující foton je rozloženo v prostoru. Říká se tu, že „pole“ nelze zjistit, jen lokálně. Pole je zakřivený čp a s ním „plavou“ i minilokální vlnobalíčky-uzlíky-fotony. Ale když se to pokusíme zjistit, můžeme to udělat jen velmi lokálně. Čím se to zjišťuje ? A můžeme si položit otázku : co přesně znamená termín foton: vztahuje se k poli nebo k části samotného pole, Jo, to bude zajímavé, fotony detekujeme jen v jedné prostorové ose, a...a nebo se týká hlavně procesů přenosu energie do pole a z pole? A teď, když si klademe všechny tyto otázky, jak dlouhá je elektromagnetická vlna fotonu? http://www.hypothesis-of-universe.com/docs/c/c_050.jpg Je to jako 1 vlnová délka, nebo je zde zobrazeno přibližně 2,5 rádu, nebo možná několik tisíc vlnových délek? Jak jsem řekl dříve, moje názory na to, co jsou fotony, se za posledních několik let docela změnilo. Ve skutečnosti byl tento experiment, který jsem provedl v říjnu 2020, který mě opravdu přiměl přemýšlet. Tento experiment jsem ukázal dříve, jako vedlejší poznámku na konci předchozího videa. To, co stavím, byla tedy upravená verze experimentu s dvojistou štěrbínou. A modifikace, kterou jsem provedl, spočíval v tom, že jsem cestu vedoucí k štěrbínám rozdělil na dvě prostorově oddělené cesty. Každá z těchto cest vede pouze k 1 konkrétní štěrbíně a obě cesty mají jinou délku. Ve skutečnosti jsem udělal nejdělsí cestu asi o 40 mm delší než nejkratší cestu. A i když 40 mm nemusí znít moc, tato vzdálenost odpovídá více než 75 000 vlnovým délkám použitého laserového světla. Když jsem nyní snížil výkon paprsku na úroveň „jednoho fotonu“, nevěděl jsem, co očekávat. Ukázalo se však, že experiment stále vykazoval velmi jasné rušení, a to i v případě, že existuje další rozdíl v cestě. Experiment tedy naznačil, že nejen jeden foton může současně provádět dráhy, které jsou prostorově odděleny na podstatnou vzdálenost, ale také umožňuje, aby tyto dráhy měly velmi významný rozdíl v délce. Pokud jste byli zvyklí vizualizovat foton jako tuto malou lokální elektromagnetickou vlnu, jako jsem to dělal já, tento experiment vypálí díru ve vašem mozku. Protože ukazuje, že interferenční vlastnosti jednotlivých fotonů se rozprostírají na úžasně dlouhé vzdálenosti ve vesmíru. A v tu chvíli jsem si uvědomil, že moje představy o fotonu byly zcela nedostatečné. A bylo tam několik lidí, kteří mi řekli, že výsledek mého experimentu se musel mýlit. Samozřejmě, aniž bychom nabízeli nějaké konkrétní poznatky o tom, proč. Osobně jsem přesvědčen, že výsledek experimentu je správný, ale nyní si také

myslím, že vysvětlení, které jsem pro toto chování uvedl, je zcela nesprávné. Chystáme se tedy udělat tento experiment znovu, ale nyní tento rozdíl v délce cesty ještě trochu roztáhneme a uvidíme, co se stane. Bude docházet k rušení, bez ohledu na to, jak dlouho uděláme druhou cestu, nebo v určitém okamžiku možná rušení zmizí? Dovolte, abych vás provedl schématem: HeNe-laser produkuje paprsek koherentního monochromatického světla. Intenzita tohoto paprsku je poté zeslabena na jednotlivé úrovně intenzity fotonu pomocí řady šedých filtrů. Dále v tomto videu proberu, jak k tomu došlo. Dále je zde rozdělovač paprsků, který vytváří 2 různé cesty pro světlo. Krátká cesta vede přímo k detektoru, zatímco prochází druhým rozdělovačem paprsků. Druhá cesta vezme paprsek na malou okružní prohlídku a nakonec přivede světlo zpět, aby se znovu spojilo se světlem z první cesty. Jak vidíte, dlouhá cesta je asi 5krát delší než krátká cesta. Poté, co je světlo obou cest rekombinováno, je zde detekováno ve fotoaparátu, kde se můžeme podívat na rušení. Ukážu vám skutečné nastavení. Tady je HeNe-laser, zlatý oldie, který byl vyroben v prosinci 1979. Při své poslední kalibraci generoval <math><1\text{ mW}</math>. Ale počkejte, říká se to v roce 1985? Nyní, i když tento laser dozrál stejně elegantně jako já za posledních 35 let, ztratil docela dost ze svého moje. Protože nyní produkuje pouze asi 0,3 mW. Ale o to lépe, protože pro tento experiment nepotřebujeme mnoho světla. Dále v nastavení je zrcadlo pod 45 stupňů, které se používá k ovládní směru paprsku,

.....

(03)- followed by a set of neutral density filters to bring the power of the laser to single photon level. The light then passes through a beam splitter, creating the two paths. The first path continues in a straight line to the detector, while passing a second beam splitter. The detector by the way is a pretty standard IP camera, with a Peltier element to reduce thermal noise a bit. The longer path in the setup is routed via a Porro prism to the second beam splitter, where it is recombined with the first beam. As you can see there is also a lens here, which is used to compact the interference pattern a bit to make the detection more sensitive. The additional mirror for the second path was necessary to achieve a detour of more than a meter long on the base plate. By placing the two recombined beams under a very small angle, the interference pattern displays only a few minima and maxima, which is convenient, because a pattern like this allows for very sensitive recognition of interference, even at extremely low intensities. The interference is recorded using a camera. And because the light levels in the room are way too high for doing single photon detection, I also shielded the setup from ambient light. For this, I used a few pieces of cardboard, just to give the setup a nice high-tech look and feel. The most important question in this experiment is: how can you be sure that the beam power of the laser is in the single photon range? Well, imagine that we have a continuous light beam coming out of a laser and we start adding gray filters that each transmit a certain fraction of the light, say 10%. At some point we will reach an output power in the beam that is equivalent to on average only a single photon at any time. So how do we do the calculation? Well, we assume that the light is quantized in discrete amounts of energy. We start out by calculating the maximum life time of such a quantum in the setup, given the speed of light and the maximum path length. For 1300mm, this value is 4.3 nanoseconds. This means that, for an average of 1 photon in the beam at any time, the photon flux can be as high as two 230 million photons per second. And using the photon energy of the laser light, this flux is equivalent to 74 picoWatts. With the current power output of the laser, which is 0.3 mW, we can calculate that we need to attenuate the beam by at least a factor of 4 million to get to this 74 pW. This means we need a filter with an optical density of 6.6 in the beam. Now, in practice I was able to detect interference with filters having an optical density of 9. And if we use these last filter settings, we can calculate that, the beam intensity is 250 times lower than that of a

beam containing, on average, 1 photon at any moment. Now that we know that we can indeed go into the single photon intensity regime, I can finally show you the result of the experiment. Do we still observe interference with a difference in path of over a meter? Let's not keep you in the dark any longer. This is what we observe in the single photon regime if either one of the paths is closed off and this is what we observe if both paths are open. Now, there is no doubt about it: even in this case we observe an interference pattern. Hence, at single photon intensity level, the photons do exhibit interference. Even if the 2 paths differ in length by a factor of 5 and in absolute length by more than 1.6 million wavelengths. Now I can assure you, the more you think about this result, the whackier it gets. And I guess whacky results ask for whacky explanations. So, in the previous video on the subject, I proposed a pretty whacky explanation. In an attempt to explain, I suggested that we could assume that the phenomenon of interference is somehow be detached from our temporal and spatial observations. So basically, my suggestion was that, because light travels with the speed of light, it does not experience time and distance, so all paths are covered instantaneously when viewed from the perspective of the photon. But in retrospect that explanation is rather silly and raises more questions than it answers. Also, there is a much simpler explanation that actually makes sense. And this explanation was suggested to me by

(03)- následuje sada filtrů neutrální hustoty, aby se výkon laseru dostal na úroveň jednoho fotonu. Světlo poté prochází rozdělovačem paprsků a vytváří dvě cesty. První cesta pokračuje v přímé linii k detektoru, zatímco prochází druhým rozdělovačem paprsků. Mimochodem, detektor je docela standardní IP kamera s Peltierovým prvkem, která trochu snižuje tepelný šum. Delší cesta v nastavení je směřována přes Porro hranol do druhého děliče paprsků, kde je rekombinována s prvním paprskem. Jak vidíte, je zde také objektiv, který se používá k malému zhuštění interferenčního obrazce, aby byla detekce citlivější. Dodatečné zrcadlo pro druhou cestu bylo nutné, aby se dosáhlo objížděky dlouhé více než metr na základní desce. Umístěním dvou rekombinovaných paprsků pod velmi malým úhlem interferenční obrazec zobrazuje pouze několik minim a maxim, což je výhodné, protože takový vzor umožňuje velmi citlivé rozpoznání interference, a to i při extrémně nízkých intenzitách. Rušení se zaznamenává pomocí kamery. A protože úrovně světla v místnosti jsou příliš vysoké na to, aby bylo možné provádět detekci jednotlivých fotonů, chránil jsem také nastavení před okolním světlem. K tomu jsem použil několik kousků lepenky, jen abych dal nastavení pěkný high-tech vzhled a dojem. Nejdůležitější otázkou v tomto experimentu je: jak si můžete být jisti, že výkon paprsku laseru je v rozsahu jednoho fotonu? Představte si, že máme nepřetržitý světelný paprsek vycházející z laseru a začneme přidávat šedé filtry, z nichž každý propouští určitý zlomek světla, řekněme 10%. V určitém okamžiku dosáhneme výstupního výkonu ve svazku, který je ekvivalentní v průměru kdykoli jedinému fotonu. Jak tedy provedeme výpočet? Předpokládáme, že světlo je kvantováno v diskrétním množství energie. Začneme výpočtem maximální doby života takového kvanta v nastavení, vzhledem k rychlosti světla a maximální délce dráhy. U 1300 mm je tato hodnota 4,3 nanosekundy. To znamená, že pro průměrně 1 foton v paprsku může být tok fotonu kdykoli až dva 230 milionů fotonů za sekundu. A s využitím fotonové energie laserového světla je tento tok ekvivalentní 74 picoWattům. Se současným výstupním výkonem laseru, který je 0,3 mW, můžeme vypočítat, že potřebujeme zeslabit paprsek alespoň o faktor 4 miliony, abychom se dostali na těchto 74 pW. To znamená, že potřebujeme filtr s optickou hustotou 6,6 v paprsku. Nyní jsem v praxi dokázal detekovat interference s filtry s optickou hustotou 9. A pokud použijeme toto poslední nastavení filtru, můžeme to vypočítat, že intenzita paprsku je 250krát nižší než u paprsku obsahujícího v průměru 1 foton kdykoli. Nyní, když víme, že můžeme skutečně přejít do režimu intenzity jediného fotonu, mohu vám konečně ukázat výsledek experimentu. Stále

pozorujeme interference s rozdílem v dráze přes metr? Už vás nebudeme držet ve tmě. To je to, co pozorujeme v režimu jediného fotonu, pokud je některá z cest uzavřena, a to je to, co pozorujeme, pokud jsou obě cesty otevřené. Nyní o tom není pochyb: i v tomto případě pozorujeme interferenční obrazec. Proto na úrovni intenzity jednoho fotonu vykazují fotony interference. I když se obě cesty liší délkou o faktor 5 a v absolutní délce o více než 1,6 milionu vlnových délek. Nyní vás mohu ujistit, že čím víc si o tomto výsledku myslíte, tím je to šílenější. A myslím, že praštěné výsledky vyžadují praštěné vysvětlení. Takže v předchozím videu na toto téma jsem navrhl dost šibalské vysvětlení. Ve snaze vysvětlit jsem navrhl, že bychom mohli předpokládat, že fenomén interference je nějak oddělen od našich časových a prostorových pozorování. Takže v zásadě můj návrh byl, že protože světlo cestuje rychlostí světla, nezažije čas a vzdálenost, takže všechny cesty jsou okamžitě pokryty při pohledu z pohledu fotonu. Při zpětném pohledu je však toto vysvětlení spíše hloupé a vyvolává více otázek, než odpovídá. Existuje také mnohem jednodušší vysvětlení, které ve skutečnosti dává smysl. A toto vysvětlení mi navrhl

.....

(04)- David Nadlinger, a researcher at Oxford university. He very kindly explained where the experiment went wrong. The physics behind it is pretty hefty and not YouTube video material, so I'll try to explain this in my own words. The essence is that the electromagnetic field of the beam, after leaving the attenuation filters, is a more or less a continuous wave or field, like drawn here schematically. And you're probably are thinking: where is the quantization? I thought light was made up of individual photons? Well, yeah but no but. [Vicky Pollard] yeah, but no ,but yeah. Thing is that, even though the energy transfer processes to- and from the field have a quantized nature, the electromagnetic field itself is actually is not quantized. It can basically take on any value. So let me explain this in a little more detail. Contrary to spontaneous emission, which is sort of a random statistical process of energy emission in discrete packages, a continuous laser like a HeNe laser emits a beam of coherent light. And the field exiting the laser is a continuous electromagnetic wave which has a high field strength. And that is because, almost all the quanta of energy are added to the beam in phase, due to the stimulated emission process. If such a beam passes the gray filters, it will decrease in intensity because of absorption of a part of the energy in the beam. And yes, this absorption process has a quantized nature, and happens in discrete steps. But it happens in sort of a random manner in time and also spread out in space within the volume of the filter. So, each absorption event takes sort of a random little bite out of the remaining field, decreasing the intensity a bit. Now, because the electromagnetic field strength itself is not quantized, this process eventually results in a sort of continuous field strength that is much lower than what is found in a true single photon event produced by spontaneous emission. The field strength can at times even be almost zero or actually zero. But even though the field is very low, it is still coherent and more or less continuous. So, this could very easily explain why we observe interference in this configuration: it is because in essence we have 2 continuous coherent beams interfering. So yes, the power of the beam is far below single photon intensity level, but none the less it is continuous. And this is very counter-intuitive if you are taught that light is quantized. So basically, I had poor choice of light source. Had I chosen a fluorescent lamp instead of a laser, my single photon calculation had actually made sense. And of course, I would also never have observed single photon interference in the current setup. The experiment by the way also shows a few other interesting aspects of light. You see that the interference pattern consists of these individual sensor pixels that light up. And it is good to realize that these are in fact not single photon detection events. What we see is CMOS-pixels that collected a specific minimum number of photons. And the reason that it is displayed like this, is

because I cranked up the gain of the camera to a very high level. Anyway, even though we are not observing single photons, we can observe this interesting phenomenon, called “shot noise”. Basically, we see that the spatial distribution of photons is not the same for each individual measurement. And this is caused by statistical variations in the photon detection for each measurement. It’s also a subtle reminder of the fact that when we can never observe interference from just a single photon. Because demonstrating interference always involves collecting many photon-detection events. In other words, what we do when we look at interference, is gathering statistical information about the spatial probability of detecting a photon somewhere. And this probability itself, like the field, is also not quantized. I guess my main problem with understanding the behavior of light was that everybody always told me that the energy in light is quantized. But they forgot to tell me that the electromagnetic wave, so the carrier of the photon energy, is not quantized. An electromagnetic field can be attenuated, diluted by traveling through space and can be split in arbitrary fractions when passing a beam splitter. The field has no problem whatsoever with this because it is not quantized.

.....

(04)- David Nadlinger, výzkumný pracovník na Oxfordské univerzitě. Velmi laskavě vysvětlil, kde se experiment pokazil. Fyzika, která je za tím, je docela statná a ne video materiál YouTube, takže se to pokusím vysvětlit svými vlastními slovy. Podstatou je, že elektromagnetické pole paprsku je po opuštění filtrů útlumu víceméně spojitá vlna nebo pole, jako zde schematicky nakreslené. A pravděpodobně si myslíte: kde je kvantizace? Myslel jsem, že světlo se skládá z jednotlivých fotonů? No, ano, ale ne, ale. [Vicky Pollard] jo, ale ne, ale jo. Jde o to, že i když procesy přenosu energie do az pole mají kvantovanou povahu, samotné elektromagnetické pole ve skutečnosti není kvantováno. V zásadě může nabývat jakékoli hodnoty. Dovolte mi tedy vysvětlit to trochu podrobněji. Na rozdíl od spontánní emise, která je jakýmsi náhodným statistickým procesem emise energie v diskretních balíčcích, kontinuální laser jako HeNe laser vyzařuje paprsek koherentního světla. A pole opouštějící laser je spojitá elektromagnetická vlna, která má vysokou intenzitu pole. A to proto, že téměř všechna množství energie se přidávají do paprsku ve fázi díky stimulovanému emisnímu procesu. Pokud takový paprsek prochází šedými filtry, sníží se jeho intenzita kvůli absorpci části energie v paprsku. A ano, tento absorpční proces má kvantovanou povahu a probíhá v jednotlivých krocích. Stává se to však náhodným způsobem v čase a také se rozprostírá v prostoru v objemu filtru. Každá absorpční událost tedy ze zbývajících pole odebere jakési náhodné malé sousto, což trochu sníží intenzitu. Nyní, protože samotná síla elektromagnetického pole není kvantována, vede tento proces nakonec k jakési síle spojitého pole, která je mnohem nižší než ta, která se nachází ve skutečné události jediného fotonu produkované spontánní emisí. Intenzita pole může být někdy dokonce téměř nulová nebo ve skutečnosti nulová. I když je pole velmi nízké, je stále soudržné a víceméně spojité. To by tedy mohlo velmi snadno vysvětlit, proč v této konfiguraci pozorujeme interference: je to proto, že v podstatě interferují dva spojitě koherentní paprsky. Takže ano, síla paprsku je hluboko pod úrovní intenzity jednoho fotonu, ale přesto je spojitá. A to je velmi protiintuitivní, pokud vás naučí, že světlo je kvantováno. Takže v zásadě jsem měl špatný výběr zdroje světla. Kdybych místo laseru zvolil zářivku, měl můj výpočet jediného fotonu smysl. A samozřejmě bych také v současném nastavení nikdy nepozoroval interferenci jednoho fotonu. Mimochodem experiment ukazuje i několik dalších zajímavých aspektů světla. Uvidíte, že interferenční obrazec se skládá z těchto jednotlivých pixelů snímače, které se rozsvítí. A je dobré si uvědomit, že ve skutečnosti nejde o události detekce jednotlivých fotonů. To, co vidíme, jsou pixely CMOS, které shromažďují konkrétní minimální počet fotonů. A důvod, proč se to takto zobrazuje, je ten, že jsem nastavil zisk kamery na velmi

vysokou úroveň. I přesto, že nesledujeme jednotlivé fotony, můžeme pozorovat tento zajímavý jev zvaný „hluk výstřelu“. V zásadě vidíme, že prostorová distribuce fotonů není pro každé jednotlivé měření stejná. A to je způsobeno statistickými změnami v detekci fotonů pro každé měření. Je to také jemná připomínka skutečnosti, že když nikdy nemůžeme pozorovat interference pouze z jednoho fotonu. Protože demonstrace interference vždy zahrnuje shromažďování mnoha událostí detekce fotonů. Jinými slovy, to, co děláme, když se díváme na interferenci, je shromažďování statistických informací o prostorové pravděpodobnosti někde detekovat foton. A tato pravděpodobnost sama o sobě, stejně jako pole, také není kvantována. Myslím, že můj hlavní problém s porozuměním chování světla byl ten, že mi každý vždy říkal, že energie ve světle je kvantována. Ale zapomněli mi říct, že elektromagnetická vlna, tedy nosič fotonové energie, není kvantována. Elektromagnetické pole může být utlumeno, zředěno cestou vesmírem a může být rozděleno v libovolných zlomcích při průchodu děličce paprsků. Pole s tím nemá vůbec žádný problém, protože není kvantováno.

.....

(05)- But of course, the probability of detection, being proportional to the square of the field strength will also be diluted or split. And that is basically what we observe when we look at interference: these dark and bright bands we observe are just the result of local variations in field strength, due to phase differences between different paths. If you consider the field as the leading property for the probability of detection, the things we observe in diffraction experiments, like for example the double slit experiment, become almost kind of trivial. Because, if quantization is not a property of the field, but just of the energy transfer processes between field and matter, the outcome of the experiment is basically what you would expect. But what is definitely not trivial to imagine, is how the energy contained in a wave, spread out in space can be converted back to another form of energy in a very local and quantized event. So, to get back to our original question: “how big is a photon of visible light”? Well, if you consider the photon to be the same thing as the electromagnetic field, photons can be absolutely huge. Or at least their volume of interaction can be huge. In fact, within this definition is no fundamental limit to its size. But if you define the photon as the quantized interaction between field and matter, then a photon is in fact an extremely localized phenomenon. You choose. [DELETED SCENE] Here is the HeNe-laser, a golden oldie which was produced in December 1979. At its last calibration, it was generating < 1mW. But wait, does it say in 1985? Hah, I remember that year. [music]

.....

(05)- Pravděpodobnost detekce, která je úměrná druhé mocnině intenzity pole, bude samozřejmě také zředěna nebo rozdělena. A to je v podstatě to, co pozorujeme, když se díváme na interferenci: tyto tmavé a světlé pásy, které pozorujeme, jsou jen výsledkem lokálních variací v intenzitě pole kvůli fázovým rozdílům mezi různými cestami. Pokud pole považujete za hlavní vlastnost pravděpodobnosti detekce, věci, které pozorujeme při difrakčních experimentech, jako například experiment s dvojitou šterbinou, se stávají téměř jakýmsi triviálním. Protože **pokud kvantování není vlastnost pole**, ale pouze procesy přenosu energie mezi polem a hmotou, **M usí v tom být zakopaný pes ve smyslu „sbalování a rozbalování lokalit dimenzí čp...** výsledek experimentu je v podstatě takový, jaký byste očekávali. Ale rozhodně není triviální si představit, je to, jak lze energii obsaženou ve vlně **rozložené v prostoru převést zpět na jinou formu energie ve velmi lokální a kvantované události.** Jistě, ale moje intuice mi říká, že ten zakopaný pes je v tom „zakřivování“ dimenzí čp a tedy v **zabalování a rozbalování křivostí dimenzí** Abychom se vrátili k naší původní

otázce: „jak velký je foton viditelného světla“? Pokud považujete foton za totéž jako elektromagnetické pole, mohou být fotony naprosto obrovské. Ano, mění se křivosti těch geonů-balíčků, natažení lokalit dimenzí s více či méně rozbalenými či sbalenými dimenzemi (foton není jen to „co je vidět“) Nebo alespoň jejich objem interakce může být obrovský. Ve skutečnosti v této definici není žádné zásadní omezení její velikosti. Ano. Pokud ale definujete foton jako kvantovanou interakci mezi polem a hmotou, pak je foton ve skutečnosti extrémně lokalizovaným jevem. Ano Ty vybíráš. [VYMAZANÁ SCÉNA] Toto je HeNe-laser, zlatý oldie, který byl vyroben v prosinci 1979. Při své poslední kalibraci generoval <1 mW. Ale počkejte, říká se to v roce 1985? Hah, ten rok si pamatuji. [hudba]