

Albert EINSTEIN

On a heuristic point of view about the creation and
conversion of light
Annalen der Physik 1905

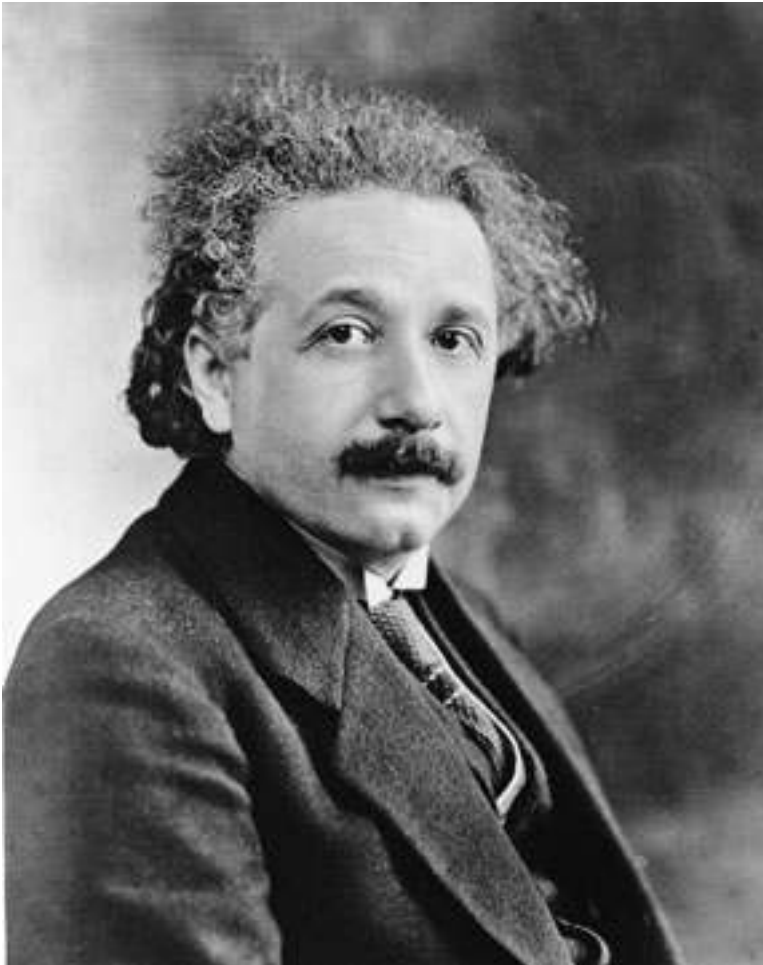
According to the assumption considered here, when a light ray starting from a point is propagated, the energy is not continuously distributed over an ever increasing volume, but it consists of a finite number of energy quanta, localized in space, which move without being divided and which can be absorbed or emitted only as a whole.

Zgodnie z wprowadzonym tu założeniem, energia wiązki światła rozchodzącej się od jakiegoś punktu nie jest rozłożona w sposób ciągły w rosnącej objętości, ale składa się ze skończonej liczby niepodzielnych kwantów energii zlokalizowanych w przestrzeni, absorbowanych i emitowanych zawsze w całości.

A L B E R T

E i n s t e i n

1 8 7 9 - 1 9 5 5



AIP Emilio Segrè Visual Archives, W. F. Meggers Collection

The Nobel Prize in Physics 1921

“for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect”

This citation indirectly refers to his pioneering formulation of the quantum theory but many physicists think he should have received the Prize for his special and general theories of relativity. In addition he proposed a theory of Brownian motion (used by Jean Perrin to establish the reality of atoms), a quantum theory of the specific heats of solids, and a generalization of S. N. Bose’s quantum theory of radiation that predicted the “Bose-Einstein condensation.” He disagreed with N. Bohr and other physicists on the interpretation and completeness of quantum mechanics, asserting that “God does not play dice” and defending the principle that sub-atomic particles and processes have a real existence apart from our observation of them.

Einstein

Wzór Einsteina dla efektu fotoelektrycznego w formie podanej w jego artykule

$$\Pi\varepsilon = (R/N)\beta\nu - P$$

Współczesna postać wzoru Einsteina

$$eV = h\nu - P$$

e - ładunek elektronu

V - spadek napięcia przyspieszającego elektron

h - stała Plancka

ν - częstość promieniowania elektromagnetycznego

P - praca wyjścia, to znaczy energia potrzebna do uwolnienia elektronu z metalu

Max Karl Ernst Ludwig PLANCK

Nagroda Nobla 1918 (ogłoszona 13 listopada 1919)

in recognition of the services he rendered to the advancement
of Physics by his discovery of energy quanta

w uznaniu zasług, które położył dla postępu w Fizyce
poprzez odkrycie kwantów energii

Wykład Noblowski 2 czerwca 1920

The genesis and present state of development
of the quantum theory

O genezie i obecnym stanie rozwoju teorii kwantów

MAX KARL ERNST LUDWIG

Planck 1858-1947



AIP Emilio Segrè Visual Archives, W.F. Meggers Collection

The Nobel Prize in Physics 1918

"in recognition of the services he rendered to the advancement of physics by his discovery of energy quanta"

Planck

If I take it correctly that the duty imposed upon me today is to give a public lecture on my writings, then I believe that this task, the importance of which I am well aware through the gratitude felt towards the noble-minded founder of our Foundation, cannot be more suitably fulfilled than by my trying to give you the story of the origin of the quantum theory in broad outlines and to couple with this, a picture in a small frame, of the development of this theory up to now, and its present-day significance for physics.

Jeżeli dobrze rozumiem, że nałożonym na mnie obowiązkiem jest wygłosić dziś publiczny wykład na temat moich artykułów, to wierzę iż to zadanie, którego wagę w pełni doceniam ze względu na wdzięczność jaką czuję w stosunku do szlachetnego fundatora tej nagrody, nie może być lepiej wypełnione niż przez moją próbę przekazania w ogólnym zarysie historii powstania teorii kwantowej i dowiązania do tego, w postaci małego wklejonego obrazka, rozwoju tej teorii do chwili obecnej i jej obecnego znaczenia dla fizyki.

Planck

“There is in particular one problem whose exhaustive solution could provide considerable elucidation. What becomes of the energy of a photon after complete emission? Does it spread out in all directions with further propagation in the sense of Huyghens’ wave theory, so constantly taking up more space, in the boundless progressive attenuation? Or does it fly out like a projectile in one direction in the sense of Newton’s emanation theory?”

Występuje w szczególności jeden problem, którego wyczerpujące rozwiązanie mogłoby w istotny sposób rozjaśnić nam obraz. Co staje się z energią oddzielnego kwantu energii po całkowitym zakończeniu emisji? Czy rozchodzi się ona we wszystkich kierunkach podlegając prawom propagacji teorii falowej Huyghensa, pokrywając coraz to większą przestrzeń i ulegając nieograniczonemu osłabieniu? Czy też leci ona jak pocisk w jednym kierunku w sensie emisyjnej teorii Newtona?

Planck

In the first case, the quantum would no longer be in the position to concentrate energy upon a single point in space in such a way as to release an electron from its atomic bond, and in the second case, the main triumph of the Maxwell theory - the continuity between the static and the dynamic fields and, with it, the complete understanding we have enjoyed, until now, of the fully investigated interference phenomena - would have to be sacrificed, both being very unhappy consequences for today's theoreticians."

W pierwszym przypadku, kwant nie byłby w stanie dostarczyć skoncentrowanej energii do pojedynczego punktu przestrzeni tak, by mógł on uwolnić elektron związany w atomie. W drugim, natomiast przypadku, musielibyśmy poświęcić główny triumf teorii Maxwella – ciągłe przejście między statycznymi i dynamicznymi polami, a wraz tym pełne zrozumienie, które tak nas dotąd cieszyło, zbadanych w najdrobniejszych szczegółach zjawisk. Oba te przypadki unieszczęśliwiłyby dzisiejszych teoretyków.

Planck

“Be that as it may, in any case no doubt can arise that science will master the dilemma, serious as it is, and that which appears today so unsatisfactory will in fact eventually, seen from a higher vintage point, be distinguished by its special harmony and simplicity. Until this aim is achieved, the problem of the quantum of action will not cease to inspire research and fructify it, and the greater the difficulties which oppose its solution, the more significant it finally will show itself to be for the broadening and deepening of our whole knowledge in physics.”

Tak czy owak, nie ma wątpliwości, że nauka zdoła przewyciężyć ten poważny dylemat, i to co wydaje się dziś niezadowalające będzie ostatecznie, oglądane z wyższego punktu widzenia, wyjątkowo prostym i harmonijnym. Zanim ten cel zostanie osiągnięty, problem kwantu działania nie przestanie inspirować i zapładniać badań. Im większe będą trudności hamujące rozwiązanie, tym bardziej znaczące ono będzie dla rozszerzenia i pogłębienia naszej całej wiedzy fizycznej.

Robert Andrews MILLIKAN

Nagroda Nobla 1923

for his work on the elementary charge of electricity and on the photoelectric effect

za prace nad elementarnym ładunkiem elektrycznym i efektem fotoelektrycznym

Wykład Noblowski, 23 maja 1924

The electron and the light-quant
from the experimental point of view

ROBERT ANDREWS

Millikan

1868-1953



AIP Emilio Segrè Visual Archives, W.F. Meggers Collection

The Nobel Prize in Physics 1923

“for his work on the elementary charge of electricity and on the photoelectric effect”

Millikan’s verification of Einstein’s formula for the photoelectric effect was considered a confirmation of quantum theory.

Millikan

“The fact that Science walks forward on two feet, namely theory and experiment, is nowhere better illustrated than in the two fields for slight contributions to which you have done me the great honor of awarding me the Nobel Prize in Physics for the year 1923. Sometimes it is one foot which is put forward first, sometimes the other, but continuous progress is only made by the use of both - by theorizing and then testing, or by finding new relations in the process of experimenting and then bringing the theoretical foot up and pushing it on beyond, and so on in unending alternations.”

Fakt, iż Nauka idzie naprzód na dwóch nogach, na teorii i na doświadczeniu, nie ma nigdzie lepszej ilustracji niż w dwóch dziedzinach, za mój skromny wkład do których spotkał mnie wielki zaszczyt przyznania Nagrody Nobla z fizyki za rok 1923. Czasami jedna noga robi najpierw krok do przodu, a czasami druga, ale stały postęp dokonuje się tylko przy użyciu obu – przez teoretyzowanie poddawane następnie sprawdzeniu, bądź przez znajdowanie nowych zależności przy eksperymentowaniu, czego następstwem jest ruch teoretycznej nogi do przodu, i tak dalej bez końca.

Millikan

“After ten years of testing and changing and learning and sometimes blundering, all efforts being directed from the first toward the accurate experimental measurement of the energies of emission of photoelectrons, now as a function of temperature, now of wavelength, now of material (contact e. m. f. relations), this work resulted, contrary to my own expectation, in the first direct experimental proof in 1914 of the exact validity, within narrow limits of experimental error, of the Einstein equation, and the first direct photoelectric determination of Planck’s h .”

Po dziesięciu latach sprawdzania, zmieniania i uczenia się a czasem i błądzenia, kierując od początku cały wysiłek na dokładny pomiar energii fotoelektronów, bądź to w funkcji temperatury, lub długości fali, czy też w zależności od materiału (potencjały kontaktowe), praca ta zaowocowała, wbrew moim oczekiwaniom, pierwszym dokładnym eksperymentalnym dowodem, w ramach niewielkich błędów doświadczalnych, równania Einsteina oraz pierwszym bezpośrednim wyznaczeniem stałej Plancka na podstawie efektu fotoelektrycznego.

Millikan

“This work, like that on the electron, has had to run the gauntlet of severe criticism, for up to 1916 not only was discussion active as to whether there were any limiting velocity of emission, but other observers who had thought that a linear relation existed between energy and frequency had not found the invariable constant h appearing as the ratio.”

Praca ta, podobnie jak ta o elektronie, musiała przejść przez „ścieżkę zdrowia” surowej krytyki, ponieważ aż do roku 1916 dyskusja toczyła się nie tylko nad tym, czy jest jakaś graniczna prędkość emisji, ale inni badacze, którzy sądzili, że istnieje liniowa zależność między energią i częstością, nie znajdowali tej samej stałej h jako ilorazu tych wielkości.

Millikan

But at the present time it is not too much to say, that the altogether overwhelming proof furnished by the experiments of many different observers, working by different methods in many different laboratories, that Einstein's equation is one of exact validity (always within the present small limits of experimental error) and of very general applicability, is perhaps the most conspicuous achievement of Experimental Physics during the past decade.

Obecnie jednak można bez przesady powiedzieć, że eksperymenty wykonane przez wielu badaczy, używających różnych metod w różnych laboratoriach, dostarczyły niepodważalnych dowodów na to, że równanie Einsteina obowiązuje dokładnie (oczywiście w ramach obecnych małych błędów doświadczalnych) i we wszystkich przypadkach, co jest być może najbardziej widocznym osiągnięciem Fizyki Doświadczalnej ostatniej dekady.

Millikan

“In view of all these methods and experiments the general validity of Einstein’s equation is, I think, now universally conceded, and to that extent the reality of Einstein’s light-quanta may be considered as experimentally established. But the conception of localized light-quanta out of which Einstein got his equation must still be regarded as far from being established.”

W wyniku wszystkich tych metod i doświadczeń, myślę że słuszność równania Einsteina jest w ogólności uznawana i pod tym względem realność kwantów światła Einsteina została eksperymentalnie ustanowiona. Jednakże koncepcja zlokalizowanych kwantów światła, z której Einstein wywiódł swoje równanie, musi być ciągle uważana za daleką od ustanowienia.

Millikan

“Within the past year, however, a young American physicist, Arthur H. Compton of the University of Chicago, by using the conception of localized light-quanta, has brought forward another new phenomenon which at least shows the fecundity of the Einstein hypothesis. Compton goes a step farther than Einstein in that he assumes not only the existence of light-quanta but also that in the impact between a light-quant and a free electron the laws of conservation of energy and of conservation of momentum both hold.”

W czasie ostatniego roku, jednak, młody amerykański fizyk, Arthur. H. Compton z Uniwersytetu w Chicago, używając pojęcia zlokalizowanych kwantów energii, zwrócił uwagę na inne zjawisko, które dowodzi płodności hipotezy Einsteina. Compton idzie jeszcze krok dalej niż Einstein zakładając nie tylko samo istnienie kwantów światła, ale także to, iż w zderzeniu kwantu światła ze swobodnym elektronem oba prawa zachowania – energii i pędu – są spełnione.

Millikan

“It may be said then without hesitation that it is not merely the Einstein equation which is having extraordinary success at the moment, but the Einstein conception as well. But until it can account for the facts of interference and the other effects which have seemed thus far to be irreconcilable with it, we must withhold our full assent.”

Można powiedzieć więc bez wahania, że to nie jedynie równanie Einsteina odnosi obecnie nadzwyczajne sukcesy, ale także koncepcja Einsteina. Zanim jednakże koncepcja ta zda sprawę ze zjawisk interferencji i innych zjawisk nie dających się dotąd z nią pogodzić, musimy powstrzymać się z jej pełną akceptacją.

Arthur Holy COMPTON

A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements

Kwantowa teoria rozpraszania promieni X przez lekkie pierwiastki

Physical Review, May 1923

Za tę pracę Compton otrzymał cztery lata później Nagrodę Nobla.

ARTHUR HOLLY

Compton

1892-1962



AIP Emilio Segrè Visual Archives, W.F. Meggers Collection

The Nobel Prize in Physics 1927

“for his discovery of the effect named after him”

The Compton effect showed that electromagnetic radiation (especially X-rays) can be scattered by single electrons as one would expect if a photon has momentum $h\nu/c$, thereby confirming the particle nature of light at a time when it was doubted by other physicists.

Compton

“The present theory depends essentially upon the assumption that each electron which is effective in the scattering scatters a complete quantum. It involves also the hypothesis that the quanta of radiation are received from definite directions and are scattered in definite directions. The experimental support of the theory indicates very convincingly that a radiation quantum carries with it directed momentum as well as energy.”

Przedstawiona teoria opiera się w istotny sposób na założeniu, że każdy elektron, który uczestniczy w rozproszeniu, rozprasza całkowity kwant. Zawiera ona także hipotezę, że kwanty promieniowania przychodzą z określonych kierunków i są rozpraszane w określonych kierunkach. Eksperymentalne potwierdzenie tej teorii przekonująco wskazuje też, że kwant energii niesie nie tylko energię, ale także skierowany pęd.

Compton

“Emphasis has been laid upon the fact that in its present form the quantum theory of scattering applies only to light elements. The reason for this restriction is that we have tacitly assumed that there are no forces of constraint acting upon the scattering electron.”

Podkreślamy fakt, że kwantowa teoria rozpraszania w jej obecnej postaci stosuje się tylko do lekkich pierwiastków. Powodem tego ograniczenia jest zrobione milczące założenie, iż nie ma żadnych sił więzów działających na elektron.

N. Bohr, H. A. Kramers, J. C. Slater

The quantum theory of radiation

Kwantowa teoria promieniowania

Philosophical Magazine, January 1924

“Although the great heuristic value of this hypothesis is shown by the confirmation of Einstein’s predictions concerning the photoelectric phenomenon, still the theory of light quanta can obviously not be considered as a satisfactory solution of the problem of light propagation.”

Mimo, iż potwierdzenie przewidywań Einsteina dotyczących efektu fotoelektrycznego wykazało wielką heurystyczną wartość tej hipotezy, w dalszym ciągu teoria kwantów światła nie może być oczywiście uznana za zadowalające rozwiązanie problemu rozchodzenia się światła.

Gilbert N. LEWIS

The conservation of photons
List do Nature, 118, 784, 1926

“Had there not seemed to be insuperable objections, one might have been tempted to adopt the hypothesis that we are dealing here with a new type of atom, an identifiable entity, uncreatable and indestructible, which acts as the carrier of radiant energy and, after absorption, persists as an essential constituent of the absorbing atom until it is later sent out again bearing a new amount of energy.”

Gdyby nie wyglądałoby jako nie do pokonania obiekcje, można by było pokusić się o przyjęcie hipotezy, iż mamy tu do czynienia z nowym rodzajem atomu, identyfikowalnym obiektem, niestwarzalnym i niezniszczalnym, który pełni rolę nośnika energii promienistej i po pochłonięciu pozostaje istotnym składnikiem atomu aż do chwili, gdy zostaje znowu wysłany unosząc nową porcję energii.

Lewis

“It would seem inappropriate to speak of one of these hypothetical entities as a particle of light, a corpuscle of light, a light quantum, or a light quant, if we are to assume that it spends only a minute fraction of its existence as a carrier of radiant energy, while the rest of the time it remains as an important structural element within the atom. . . . I therefore take the liberty of proposing for this hypothetical new atom, which is not light but plays an essential part in every process of radiation, the name photon.”

Byłoby niewłaściwe mówić o tych hipotetycznych obiektach, jako o cząstkach światła, czy też kwantach światła, skoro zakładamy, że spędzają one tylko drobny ułamek czasu swego istnienia jako nośniki energii promienistej, pozostając przez całą resztę czasu ważnymi strukturalnymi składnikami atomów. . . . Zdecydowałem się więc zaproponować dla tego hipotetycznego, nowego atomu, który nie jest światłem, ale odgrywa istotną rolę w każdym procesie radiacyjnym, nazwę foton.

A. Einstein

List do Michele Angelo Besso, December 12, 1951

“All the fifty years of conscious brooding have brought me no closer to the answer of the question: “What are light quanta?” Of course, today every rascal thinks he knows the answer, but he is deluding himself.”

Trwające pięćdziesiąt lat świadome rozmyślania nie przybliżyły mnie do odpowiedzi na pytanie: “Czym są kwanty światła?” Obecnie, każdy lump myśli, że zna odpowiedź, ale się tylko łudzi.

Od historii do teraźniejszości

Opisana tu historia odkrycia fotonu przybliżyła nam chyba trochę pojęcie fotonu, ale także oddaliliśmy się nieco od pierwotnego **pojęcia pola elektromagnetycznego**, które powstało na długo przed **pojęciem fotonu**.

Czym jest pole elektromagnetyczne i jaki jest jego związek z fotonami?

Związek ten przez wiele lat pozostawał zagadką.

Jak widzieliśmy jeszcze 20 lat po odkryciu Einsteina, o teorii fotonowej światła Compton głosił, że “musimy powstrzymać się z jej pełną akceptacją”. Dwa lata później powstała mechanika kwantowa i zagadka fotonu została na gruncie tej teorii wyjaśniona. Użyty tu przeze mnie zwrot “na gruncie tej teorii” oznacza, że umiemy wyjaśnić zachowanie się fotonów i ich związek z polem elektromagnetycznym, ale musimy za to zapłacić wysoką cenę: Musimy przyjąć wszystkie nie do końca zrozumiałe reguły teorii kwantów. Przede wszystkim musimy zadowolić się **statystycznym opisem pola elektromagnetycznego**.

Tylko w jednym uniwersyteckim podręczniku fizyki autorzy podjęli próbę wyjaśnienia związku między polem elektromagnetycznym i fotonami

Halliday-Resnick-Walker Podstawy Fizyki Tom 5

“Prawdopodobieństwo (przypadające na jednostkowy przedział czasu), że w pewnej małej objętości wokół danego punktu w fali świetlnej zostanie wykryty foton, jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy wektora pola elektrycznego tej fali w danym punkcie. Uzyskaliśmy w ten sposób probabilistyczny opis fali świetlnej, a więc inny obraz światła. Jest to nie tylko fala elektromagnetyczna, ale także fala prawdopodobieństwa.”

Niestety, opis ten nie jest w pełni poprawny.

Przede wszystkim trzeba uwzględnić, że pole elektromagnetyczne w teorii kwantowej nie ma jednoznacznie określonej wartości.

Można jedynie mówić o **średnim polu**.

Pojęcie pola elektromagnetycznego, jako **dokładnie określonej funkcji** w przestrzeni i w czasie w teorii kwantowej traci sens. Zdarza się bowiem często tak, że średnie pole jest równe zero, ale kwadratowe odchylenie od zera jest bardzo duże. Na szczęście odkryta osiemdziesiąt lat temu przez **Diraca** i rozwinięta później przez wielu innych kwantowa teoria pola elektromagnetycznego doskonale radzi sobie z tymi problemami. Na gruncie tej teorii można na przykład wytłumaczyć doświadczalny fakt, iż dokonując pomiaru na przykład pola elektrycznego odpowiednim przyrządem pomiarowym odczytujemy określoną wartość: tyle a tyle woltów na metr. Dzieje się tak dlatego, że w najczęściej spotykanych sytuacjach wszystkie fotony uczestniczące w wytworzeniu stanu pola elektromagnetycznego **“są takie same”** i jest ich w dodatku ogromnie dużo. W takim wypadku wartość średnią można uznać za wielkość charakteryzującą każdy foton.

**Możemy zatem utożsamić stan fotonu
ze stanem pola elektromagnetycznego**

PAUL ADRIEN MAURICE

Dirac 1902-1984



Photo by A. Bortzells Tryckeri,
courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives

The Nobel Prize in Physics 1933

was awarded to Paul Dirac and E. Schrodinger "for the discovery of new productive forms of atomic theory"

Dirac developed the mathematical theory of quantum mechanics and proposed antisymmetric wave functions for systems of several identical particles (electrons, protons or neutrons) — systems that obey "Fermi-Dirac statistics." He also proposed a relativistic quantum equation that included spin in a natural way; it led him to predict antiparticles and in particular the positron, later discovered by C. D. Anderson.

Możemy także powiedzieć, że obserwowane pola elektromagnetyczne charakteryzują się tym, iż wszystkie fotony są w tym samym stanie. Jest to możliwe, ponieważ fotony są bozonami.

Nazwa ta pochodzi od nazwiska Bose hinduskiego fizyka, który opisał statystyczne własności cząstek, których dowolnie duża liczba może przebywać w tym samym stanie.

Dla elektronów, które są fermionami taka sytuacja nie jest możliwa i dlatego nie ma odpowiednika pola elektromagnetycznego dla elektronów.

SATYENDRA NATH

B o s e

1894-1974



Indian National Council of Science Museums,
courtesy of Physics Today Collection

Indian mathematician noted for his collaboration with Einstein which led to their developing "Bose-Einstein statistics"—a theoretical treatment of the gas-like properties of electromagnetic radiation.

Na zakończenie przytoczę wzór, który pozwala określić ile fotonów (średnio) uczestniczy w wytworzeniu pola elektromagnetycznego

Średnia liczba fotonów

$$N = \frac{1}{4\pi^2\hbar} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \int d^3r \int d^3r' \left[\frac{\vec{B}(\vec{r}) \cdot \vec{B}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} + \frac{\vec{E}(\vec{r}) \cdot \vec{E}(\vec{r}')}{c^2 |\vec{r} - \vec{r}'|^2} \right]$$

Na przykład dla pola magnetycznego o natężeniu 1 Tesla otrzymujemy $5 \cdot 10^{31}$ fotonów na metr sześcienny. Jest to tak ogromna liczba, że nawet gdy uznamy, że pole o natężeniu 1T występuje tylko w wyjątkowo silnych magnesach i należy je zastąpić, na przykład ziemskim polem magnetycznym, to i tak otrzymamy liczbę rzędu

10^{20} fotonów na metr sześcienny.