



# Obchodzenie twierdzenia Goldstone'a

Wykład noblowski Petera Higgsa (Uniwersytet w Edynburgu, Szkocja), 8 grudnia 2013<sup>1</sup>

Moja opowieść zaczyna się w roku 1960, w którym zostałem zatrudniony jako wykładowca fizyki matematycznej na uniwersytecie w Edynburgu. Zanim podjąłem obowiązki zostałem zaproszony do komitetu organizacyjnego pierwszej Letniej Szkoły Fizycznej Uniwersytetów Szkockich. Poproszono mnie bym był gospodarzem Szkoły w lipcu; moim głównym zadaniem miało być kupowanie wina, które miało być serwowane każdego wieczora podczas kolacji i doglądanie jego dostaw.

Wśród studentów uczestniczących w Szkole było czterech, którzy dyskutując o fizyce teoretycznej długo w nocy pozostawali w ogólnej sali koledżu Newbattle Abbey (będącej kryptą dawnego opactwa) i rzadko wstawali na porę, by zdążyć na pierwsze wykłady. Byli to doktorzy N. Cabibbo (z Rzymu), S.L. Glashow (z CERNu) oraz panowie D.W. Robinson (z Oksfordu) i M.J.G. Veltman (z Utrechtu). Po latach Cabibbo powiedział mi, że ich dyskusje były zakrapiane winem zabezpieczonym podczas kolacji, które chowali w wielkim zegarze znajdującym się w krypcie.

Jako że miałem inne rzeczy do roboty (m.in. zabezpieczanie wina) nie uczestniczyłem w tych dyskusjach i z tego powodu nie dowiedziałem się o napisanej wcześniej pracy Glashowa na temat elektroslabej unifikacji.

## Złamane symetrie

Pierwszego roku pracy w charakterze wykładowcy poszukiwałem jakiegoś programu badawczego, którym by warto było się zająć. W trakcie poprzednich czterech lat spędzonych w Londynie nieco się pogubiłem w fizyce cząstek i zacząłem się interesować kwantową grawitacją. Od czasów studenckich fascynowała mnie symetria byłem więc zdziwiony przybliżonymi symetriami (które dziś nazywamy symetriami zapachowymi) fizyki cząstek.

Wówczas, w roku 1961, przeczytałem prace Nambu i Goldstone dotyczące modeli łamania symetrii w fizyce cząstek; modele te były oparte na analogii z nadprzewodnictwem. (Model Nambu był wzorowany na teorii Bardeena, Coopera i Schriefera wykorzystującej kondensację Bosego par elektronowych; Goldstone zaś wykorzystywał pola skalarnie mające indukujący kondensację Bosego potencjał o kształcie butelki wina, taki jak we wcześniejszej teorii Ginzburga–Landaua). To co wydało mi się szczególnie pociągające, to koncepcja *spontanicznie* złamanej symetrii: takiej, która jest ścisłą symetrią podstawowej dynamiki, ale która wydaje się być łamana w obserwowanych zjawiskach z powodu asymetryczności stanu podstawowego (czyli w kwantowej teorii pola tzw. próżni).

W owym czasie większość teoretyków nie poświęcała specjalnej uwagi teoriom Nambu i Goldstone'a. Kwantowa teoria pola, mimo sukcesów elektrodynamiki kwantowej, wyszła z mody: nie radziła sobie ani z silnymi, ani ze słabymi oddziaływaniami.

Fizyka materii skonensowanej była zaś powszechnie postrzegana jako zupełnie odrębny obszar. Victor Weisskopf (jak wspominał R. Brout) podczas seminarium w Cornell w 1961 r. miał powiedzieć:

„Fizycy od cząstek są obecnie tak zdesperowani, że muszą czerpać z nowych idei pojawiających się w fizyce układów wielu ciał, takich jak teoria BCS. Może coś z tego wyjdzie.”

## Twierdzenie Goldstone'a

W realizacji programu Nambu istniała pewna przeszkoda. Nambu pokazał był, w jaki sposób spontaniczne złamanie symetrii chiralnej może prowadzić do powstania mas cząstek o spinie 1/2, takich jak proton i neutron, ale jego model przewidywał także, w sprzeczności z danymi doświadczalnymi, istnienie neutralnych bezmasowych cząstek o spinie zero (piony?). (Jak to zauwa-

1. Opublikowano w języku polskim za zgodą Nobel Foundation ©The Nobel Foundation 2013.

zył Weinberg, cząstki takie dominowałyby w wypromieniowywaniu energii przez gwiazdy.) Goldstone zaś podał argument, że takie bezmasowe cząstki muszą zawsze być rezultatem wzbudzeń [pola]<sup>2</sup> wokół dna potencjału o kształcie butelki od wina.

W roku 1962, w praca Goldstone'a, Salama i Weinberga zatytułowana „Broken Symmetries” przyniosła dowód „twierdzenia Goldstone'a”, mówiącego, że jeśli lagrangian jawnie lorentzowsko niezmienniczej kwantowej teorii pola jest niezmienniczy względem jakiejś ciągłej symetrii to albo stan próżni jest niezmienniczy albo muszą istnieć bezspinowe cząstki o zerowej masie. Twierdzenie to zdawało się kłaść kres programowi Nambu.

### Czy można obejść twierdzenie Goldstone'a?

W roku 1963 Phil Anderson, teoretyk zajmujący się materią skondensowaną pokazał, że w nadprzewodniku dzięki długozasięgowemu oddziaływaniu coulombowskiemu, mod Goldstone'a staje się masywnym modem „plazmonowym” i że mod ten jest po prostu podłużnym partnerem poprzecznych modów elektromagnetycznych, które także są masywne. Anderson uczynił też uwagę, że „Trudność związana z goldstonowską zerową masą nie jest poważna, bo przypuszczalnie możemy ją skasować z (zrównoważyć?) podobnym problemem zerowej masy yang-millsowskiej.” Nie pokazał jednak, że twierdzenie Goldstone'a ma jakieś ograniczenia i *nie* przedyskutował żadnego modelu relatywistycznego, więc teoretycy od cząstek, takcy jak ja, przyjmowali jego uwagę sceptycznie.

W marcu 1964 roku Abe Klein i Ben Lee wysunęli myśl, że nawet w relatywistycznych teoriach pewien związek, który był kluczowy w dowodzie twierdzenia Goldstone'a, może być modyfikowany o dodatkowy człon, tak jak w teoriach materii skondensowanej. W lipcu jednak Wally Gilbert (który właśnie przerzucał się z fizyki teoretycznej na biologię molekularną, w której pracując zdobył później nagrodę Nobla z chemii) wykluczył występowanie tego członu jako łamiącego niezmienniczość Lorentzowską.

W tym to właśnie punkcie miała miejsce moja interwencja.

### Jak obejść twierdzenie Goldstone'a

Pracę Gilberta przeczytałem 16 lipca 1964 roku – opublikowana była ona miesiąc wcześniej, ale w tych czasach numery *Physical Review Letters* przychodziły na uniwersytet w Edynburgu drogą morską – i byłem nią rozczar-

rowany gdyż oznaczała, iż nie można uniknąć twierdzenia Goldstone'a.<sup>3</sup> Ale przez następny weekend zacząłem sobie przypominać, że już gdzie indziej widziałem podobne pozorne pogwałcenie niezmienniczości Lorentzowskiej: nie gdzie indziej, tylko w kwantowej elektrodynamice takiej, jak ją formułował Julian Schwinger.

Elektrodynamika kwantowa jest niezmiennicza względem przekształceń cechowania i cechowanie musi zostać ustalone, przed wprowadzeniem dobrze określonego formalizmu kwantowego. Modnym sposobem realizowania tego było wybieranie cechowania Lorentza, które jest jawnie zgodne ze niezmienniczością relatywistyczną. Cechowanie to ma jednak pewne niezadawalające właściwości i to skłoniło Schwingera do przedkładania nad nie cechowania Coulomba, które prowadzi do pozornego konfliktu z relatywistyką. Niemniej, było dobrze wiadomo, że wybór ten nie prowadzi do żadnej niezgodności przewidywań fizycznych z teorią względności.

Już w roku 1962 Schwinger opublikował był pracę, w której rozprawił się z powszechnym poglądem, że to sama niezmienniczość względem cechowania wymaga, by foton był bezmasowy. Pokazał, przykładowe właściwości teorii z cechowaniem i masywnymi „fotonami”, ale nie przedstawił szczegółów prowadzącej do tego dynamiki.

W trakcie weekendu 18–19 lipca uświadomiłem sobie, iż sposób, w jaki Schwinger formułował teorie z cechowaniem podważał aksjomaty wykorzystane przy dowodzie twierdzenia Goldstone'a. Zatem teorie z cechowaniem mogły ocalić program Nambu.

W następnym tygodniu napisałem o tym krótki artykuł. 24 lipca wysłałem do go *Physical Review Letters*, gdzie został przyjęty do druku.

W tym czasie wypisałem już (klasyczne) równania pola najprostszego modelu, jaki zdołałem wymyślić, ilustrującego [tę możliwość], będącego rezultatem wprowadzenia oddziaływania elektromagnetycznego do najprostszego skalarnego modelu Goldstone'a. Było jasne, że w tym modelu bezmasowy mod Goldstone'a stawał się podłużną poaryzacją masywnego „fotonu” o spinie 1, tak jak to sugerował Anderson.

Moje druga krótka praca zawierająca zwięzły opis tego modelu została wysłana do *Physics Letters* 31 lipca. Została ona odrzucona. Redaktor (z CERNu) zaproponował bym rozwinął jeszcze bardziej tę ideę i napisał kompletne sprawozdanie do *Il Nuovo Cimento*.

Byłem tym oburzony: wydawało mi się, że recenzent nie zrozumiał istoty pracy. (Później kolega, który wrócił z miesięcznego pobytu w CERNie, powiedział mi, iż

2. Wyrazy w nawiasach kwadratowych pochodzą od tłumacza (przyp. red.).

3. Raczej: konsekwencji twierdzenia Goldstone'a (przyp. tłum.).

tamtejsi teoretycy nie uważali, że jest ona ważna dla fizyki cząstek). Wydawało mi się także dziwne, że pierwsza praca została zaakceptowana, a jej bardziej fizyczna kontynuacja nie.

Postanowiłem uzupełnić pracę pewnymi uwagami dotyczącymi fizycznych konsekwencji i wysłać poprawioną wersję za Atlantykę do *Physical Review Letters*. Wśród dodanych uwag była następująca: „Warto zauważyć, że zasadniczą cechą tego rodzaju teorii jest przewidywanie istnienia niekompletnych mutipletów skalarnych i wektorowych bozonów.”

*Physical Review Letters* otrzymało poprawioną pracę 31 sierpnia. Została przyjęta do druku. Recenzent poprosił mnie o skomentowanie jej związku z pracą Englerta i Brouta, która została opublikowana w tym samym czasie (redakcja otrzymała ją 22 czerwca). Do tego momentu nie byłem świadom ich pracy, ale dodałem do mojej pracy odpowiedni przypis, gdy tylko otrzymałem jej kopię. Dwadzieścia lat później, na konferencji w roku 1984, spotkałem Nambu, który zdradził mi, iż to on był recenzentem obu tych prac.

### Postscriptum

Minęło trochę czasu, nim prace Englerta i Brouta oraz moja (a także praca Guralnika, Hageny i Kibble'a, opublikowana przez nich nieco później) znalazły uznanie.

Moja dłuższa praca (z roku 1966) została napisana jesienią 1965 r. w Chapel Hill w Północnej Carolinie, gdzie dzięki memu zainteresowaniu kwantową grawitacją spędziłem naukowy urlop zaproszony przez Bryce'a DeWitta. Jej preprint który wysłałem Freemanowi Dy-

sonowi spotkał się z pozytywnym odzewem: Dyson zaprosił mnie do wygłoszenia seminarium w Instytucie Studiów Zaawansowanych w Princeton. Tam, w marcu 1966 roku stanąłem przed słuchaczami, wśród których byli teoretycy od aksjomatycznej kwantowej teorii pola, nadal przekonani, iż od twierdzenia Goldstone'a nie może być wyjątków.

Następnego dnia wygłosiłem seminarium na Harvardzie (zorganizowane przez Stanley'a Desera) dla innego sceptycznie nastawionego audytorium, w którym zasiadał Wally Gilbert. I to jakoś przetrzymałem. Po seminarium Shelly Glashow pochwalił mnie za wymyślenie „ładnego modelu”, ale nie dostrzegł jego znaczenia dla jego własnej teorii elektroslabej – okazja została stracona!

Nasza szóstka, tj my, którzy opublikowaliśmy prace w roku 1964, mieliśmy nadzieje, podobnie jak Nambu, że zastosujemy nasze idee do złamanej symetrii zapachowej oddziaływań silnych. To jednak nie działało. Właściwe ich zastosowanie znaleźli Weinberg i Salam dopiero w roku 1967.

Jeszcze cztery lata minęły zanim Gerard 't Hooft, kontynuując program Veltmana udowodnił renormalizowalność takich teorii<sup>4</sup> i następne dwa, nim odkrycie tzw. prądów neutralnych pokazało, iż elektroslaba unifikacja Gashowa była poprawna. A w roku 1976 Ellis, Gaillard i Nanopoulos z CERNu przekonali eksperymentatorów, iż warto szukać masywnych bezspinowych bozonów przez przewidywanych przez teorię.

---

4. Tzn. takich jakie zaproponował Weinberg – przyp. tłum.