

Związek kosmologii z fizyką cząstek elementarnych

Henryk Drozdowski

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Fizyki

Dążenie do zrozumienia Wszechświata – jak on działa i skąd się wziął – to najstarsza i największa przygoda intelektualna w historii ludzkości. „Nauka to poszukiwanie prawdy – twierdzi filozof nauki Karl Popper – nie posiadanie wiedzy, lecz poszukiwanie prawdy”.

Odkrycia współczesnej fizyki pokazują, że dwie granice ludzkiego zrozumienia – mikroświat cząstek elementarnych i Kosmos gwiazd i galaktyk – obecnie łączą się ze sobą w nieoczekiwany sposób. Nauka w miarę odtwarzania historii Wszechświata, odkrywa jedność praw Kosmosu. Chociaż nadzieja na osiągnięcie absolutnej jedności wydaje się nierealna, dążenie do objaśnienia Wszechświata na podstawie niewielkiej liczby fundamentalnych zasad i podstawowych pojęć jest jedną z najważniejszych cech strategii rozwoju współczesnej fizyki [1]. Dostrzegamy – mimo różnorodności i różnorodności zjawisk i cech – identyczność struktur i związków przyczynowych w świecie Przyrody.

Do opisu i zrozumienia procesów występujących na początku Wszechświata potrzeba dokładnej znajomości zarówno kosmologii, jak i fizyki cząstek elementarnych. Steven Weinberg zwykł mawiać, że jeśli konsekwentnie będziemy zadawać pytania: Dlaczego...?, Dlaczego...?, Dlaczego...?, to musimy znaleźć się na poziomie kosmologii i cząstek elementarnych. „...W nauce o przyrodzie nieożywionej – jak pisał W.L. Ginzburg – są tylko dwa podstawowe problemy: fizyka cząstek elementarnych i kosmologia... w tych właśnie dziedzinach astronomii i fizyki znajduje się obecnie granica między *wiedzą*, choćby niekompletną, a gęstą mgłą *niewiedomego*”.

Celem wykładu jest pokazanie, jak trzy wielkie odkrycia dokonane w XX wieku, zbliżyły nas do unifikacji fizyki, do jednolitego fizycznego obrazu świata. Unifikacja ta dokonała się właśnie na poziomie kosmologii i cząstek elementarnych.

1. Odkrycie zjawiska rozszerzającego się Wszechświata

Najgłębszym i najbardziej zaskakującym odkryciem naukowym dokonanym w XX wieku było odkrycie, że żyjemy w ciągle zmieniającym się Wszechświecie. W 1929 roku Edwin Hubble zadał śmiertelny cios odwiecznemu przekonaniu o statyczności Wszechświata. Wykazał, że galaktyki oddalają się od siebie z prędkością wprost proporcjonalną do wzajemnej odległości. Oznacza to, że galaktyka odległa o 10 milionów lat świetlnych oddala się od nas z prędkością 220 km/s, a galaktyka odległa o miliard lat świetlnych oddala się od nas z prędkością 22 000 km/s. W odległej przeszłości gęstość rozmieszczenia galaktyk w przestrzeni była więc znacznie większa i średnia temperatura Wszechświata wyższa. Prawo Hubble’a zostało sprawdzone dla bardzo dużej liczby galaktyk.

Odkrycie Hubble'a stanowi jawny dowód empiryczny, że Wszechświat się rozszerza. Odkrycie zjawiska rozszerzania się Wszechświata odegrało najważniejszą rolę w ukształtowaniu się współczesnego poglądu na istotę rzeczywistości fizycznej. Zjawisko „ucieczki galaktyk” stanowi, ze względu na swą skalę i zasięg, najpotężniejszy ze znanych nam procesów fizycznych.

Wiemy, że Wszechświat rozpoczął swą ewolucję w cyklu procesów związanych z Wielkim Gorącym Wybuchem startującym od osobliwości punktowej. Te procesy ewolucyjne rozpoczęły się w czasie rzędu 10^{10} lat od obecnej ery. W ciągu tego czasu materia zawarta we Wszechświecie przechodziła różne przemiany, które poznaje fizyka. Istnieją ważne fakty obserwacyjne i eksperymentalne świadczące o poprawności takiego podejścia.

Jeżeli Wszechświat się rozszerza, to musiał wystąpić czynnik zapoczątkowujący to rozszerzanie się, mówimy zatem o teorii Wielkiego Wybuchu [2]. Nagromadzona w tym początkowym małym obszarze energia, odpowiadała ogromnym temperaturom. Stąd też wywodzi się nazwa teorii Gorącego Wielkiego Wybuchu. Po odkryciu Hubble'a pytanie o narodziny Wszechświata nabrało pierwszorzędного znaczenia. W szczególności dlatego, że wartość stałej Hubble'a pozwala obliczyć wiek Wszechświata. Odkrycie Hubble'a wprowadziło zagadnienie początku Wszechświata do królestwa nauki [2, 3].

2. Odkrycie relikтового mikrofalowego promieniowania tła kosmicznego

Teorię Wielkiego Wybuchu potwierdziło odkrycie w 1965 roku przez Arno Penziasa i Roberta Wilsona Mikrofalowego Promieniowania Tła (MPT), będącego pozostałością po tym Wybuchu. Odkrycie MPT było niezwykle doniosłe i odegrało decydującą rolę w ustaleniu się ewolucyjnego modelu Wszechświata. W 1965 roku oprócz teorii gorącego Wielkiego Wybuchu istniały alternatywne teorie na temat początków Wszechświata, lecz żadna z nich nie przewidywała istnienia takiego promieniowania i żadna nie potrafiła go wytłumaczyć [4]. Odkrycie MPT przez Penziasa i Wilsona stało się koronnym dowodem obserwacyjnym tego, że rozszerzanie się Wszechświata rozpoczęło się od stanu charakteryzującego się wysoką temperaturą i ogromną gęstością materii.

Teoria Wielkiego Wybuchu jest jedną z największych konstrukcji myśli naukowej XX wieku. Okazało się, że wynikiem Wielkiego Wybuchu jest nie tylko „ucieczka” galaktyk i kosmiczne MPT, ale i inne, sprawdzalne empirycznie konsekwencje. Najważniejszą z nich jest pierwotny skład chemiczny materii [5]. Skład chemiczny Wszechświata dowodzi również, że Wielki Wybuch rzeczywiście się wydarzył. Mianowicie Wielki Gorący Wybuch był tygłem, w którym z nukleonów powstawały jądra atomowe pierwiastków cięższych. Wszechświat był kiedyś tak gorący, że nie mógł istnieć żaden pierwiastek chemiczny z wyjątkiem protonu. Obserwowana obfitość helu we Wszechświecie (24%) jest większa niż jego ilość, jaka mogła być wyprodukowana we wnętrzach gwiazd, wobec czego hel ten musiał powstać w procesie zachodzącym we wczesnej,

gorącej fazy ewolucji Wszechświata. Mógł on zostać wytworzony w takiej ilości jedynie w gorącej fazie istnienia Wszechświata, gdy swobodne neutrony nie zdążyły jeszcze się rozpaść. Gdyby cała widoczna masa została wyprodukowana w gwiazdach, żaden znany proces fizyczny nie mógł by wytłumaczyć pochodzenia takich ilości helu [6].

Skąd biorą się te przewidywania? Bardzo młody Wszechświat przypominał wnętrze gwiazdy – był bardzo gęsty i gorący. Zachodziły więc reakcje jądrowe prowadzące do syntezy helu. W czasie rzędu 10 s po Wielkim wybuchu rozpoczęła się synteza występujących wtedy nukleonów na najlżejsze jądra: deuter, tryt, ^3He i ^4He . Po paru minutach reakcje ustały. Obserwacje potwierdzają, że w najstarszych znanych obiektach zawartość helu nie maleje do zera, lecz osiąga stałą wartość, zgodną z przewidywaniami. Na podstawie przewidzianych przez teorię warunków we Wszechświecie, takich jak panujące wtedy temperatury, gęstości neutronów i protonów, energie i gęstości fotonów, można obliczyć, że stosunek masy wytworzonego wówczas helu do masy wodoru wynosi około 23 %. To teoretyczne przewidywanie doskonale zgadza się z obserwowaną wartością tego stosunku, około 25 %, jeżeli uwzględnimy fakt, że niewielka część istniejącego obecnie helu została zsyntetyzowana później we wnętrzach gwiazd w wyniku reakcji jądrowych, będących źródłem ich energii [7].

Ponadto, we Wszechświecie występuje niewielka, ale mierzalna ilość deuteru. A gwiazdy „spalają” bardzo łatwo deuter i niemożliwe jest by mogły go wyprodukować w ilościach nawet zbliżonych do jego obserwowanego rozpowszechnienia. Deuter byłby praktycznie nieobecny w stacjonarnym Wszechświecie. Tak więc wodór i częściowo hel stały się „materiałem wyjściowym” do wszystkiego, co powstało później – do budowy gwiazd, galaktyk, planet, innych ciał niebieskich a także naszego życia. Atomy we Wszechświecie powinny występować przede wszystkim w postaci wodoru i helu (wszystkie cięższe to jedynie śladowa domieszka) i to zostało potwierdzone przez Cecylię Payne-Gaposchkin jeszcze w latach trzydziestych XX wieku.

Teoria Wielkiego Wybuchu wyjaśnia, w jaki sposób w ciągu pierwszych trzech minut zostały wytworzone wszystkie składniki, z których narodziły się gwiazdy, oraz tłumaczy dlaczego wodór i hel są najbardziej rozpowszechnionymi pierwiastkami we Wszechświecie.

Model gorącego Wielkiego Wybuchu podał pierwszą konkretną propozycję obrazu świata w jego stadium początkowym. Umożliwiło to przeprowadzenie analizy reakcji między cząstkami elementarnymi, w wyniku których powstawały różne jądra, a następnie porównanie przewidywań z danymi o częstotliwości występowania poszczególnych pierwiastków we Wszechświecie [6 – 8].

Znaczenie odkrycia Hubble’a i MPT trudno przecenić. W sposób bezpośredni łączą się one z odkryciem anizotropii, czyli niewielkich fluktuacji temperatury MPT przez zespół Mathera i Smoota [9]. Stanowi to klucz do tajemnicy –

dłaczego po setkach milionów lat wreszcie powstały kosmiczne struktury. Wyniki pomiarów fluktuacji MPT zawierają informacje o wielkoskalowej strukturze Wszechświata we wczesnych stadiach jego ewolucji.

W 1998 roku Saul Perlmutter, Brian Schmidt i Adam Riess odkryli przyspieszoną ekspansję Wszechświata na podstawie obserwacji Supernowych typu *I a*.

3. Odkrycie bozonów pośredniczących

W 1967 roku Steven Weinberg, Abdus Salam i Sheldon Lee Glashow stworzyli teorię (zwaną dalej w skrócie teorią W-S-G) unifikującą oddziaływania elektromagnetyczne i jądrowe słabe. W teorii tej pola oddziaływań elektromagnetycznych i słabych jądrowych są różnymi manifestacjami tego samego oddziaływania uniwersalnego. Oznacza to, że połączenie tych dwu oddziaływań w jedno leży znacznie głębiej, niż docieraliśmy naszymi dotychczasowymi eksperymentami. W fizycznym obrazie obecnego Wszechświata oddziaływania elektromagnetyczne i słabe występują jako praktycznie od siebie niezależne. Zgodnie z teorią W-S-G oddziaływania te łączą się dopiero w energiach rzędu około 100 GeV , dając jedno oddziaływanie, które nazywamy oddziaływaniem elektroslabym. Ponieważ podobne warunki panowały we Wszechświecie po Wielkim Wybuchu w bardzo gęstej i gorącej materii, gdy jego wiek wynosił 10^{-12} s , można przypuszczać, że właśnie wtedy dokonał się rozpad oddziaływania elektroslabego na istniejące dziś odrębnie oddziaływania elektromagnetyczne i jądrowe słabe. Rozpatrując ten proces wstecz w czasie, można mówić, iż dokonała się wówczas mała unifikacja oddziaływań fizycznych.

Teoria zunifikowana oddziaływań elektroslabych przewiduje występowanie cząstek, tak zwanych bozonów pośrednich W^+, W^-, Z^0 , pośredniczących w oddziaływaniach słabych analogicznie do fotonów pośredniczących w oddziaływaniach elektromagnetycznych. Ze względu na skończony i bardzo mały zasięg oddziaływań słabych, cząstki te w odróżnieniu od fotonu muszą mieć sporą masę spoczynkową. Dla potwierdzenia teorii W-S-G należało więc cząstki te wykryć w zderzeniach dostatecznie wysokiej energii do ich wytworzenia. Aby sprawdzić teorię ich unifikacji, należało sięgnąć nowym eksperymentem głębiej, do obszaru, gdzie przejawiać się powinny zjawiska związane z przeplataniem się tych dwu oddziaływań, wynikającym z ich unifikacji. W eksperymentach tych należało zbliżyć do siebie oddziałujące cząstki na bardzo małe odległości, na których pojawienie się cząstek pośredniczących w oddziaływaniach słabych w obrazie kwantowym staje się porównywalnie prawdopodobne do występowania fotonów oddziaływania elektromagnetycznego. Teoria W-S-G znalazła empiryczne potwierdzenie w eksperymencie wykonanym w Europejskim Centrum Badań Jądrowych (CERN) w Genewie z użyciem akceleratora, kiedy to udało się osiągnąć wymaganą energię. W 1983 roku cząstki W^+, W^-, Z^0 zostały zaobserwowane w zderzeniach proton-antypoton, co potwierdziło istnienie zuni-

fikowanych oddziaływań elektrosłabych. Wzrost temperatury sprawia, że pojawiają się coraz cięższe bozony pośredniczące, dzięki którym różnice między dotychczas różnymi cząstkami znikają. Rejestracja bozonów pośredniczących W^+ , W^- , Z^0 w CERN-ie była odtworzeniem pierwszych chwil rodzącego się Wszechświata. W szczególności przypuszczamy, że „tuż po” kreacji we Wszechświecie występował jeden typ cząstek rządzony jedną uniwersalną siłą, opisaną Teorią Wielkiej Unifikacji (GUT – Grand Unified Theory).

Trzy odkrycia: Hubble’a, kosmicznego MPT i bozonów pośredniczących W^+ , W^- , Z^0 rzutują nie tylko na całą naukę, lecz również na nasze widzenie świata. Odegrały one najważniejszą rolę w ukształtowaniu się współczesnego poglądu na istotę rzeczywistości fizycznej. Na podstawie tych odkryć wyłania się obraz ewolucji Wszechświata ze stanu o ogromnej gęstości i temperaturze, czyli od gorącego Wielkiego Wybuchu.

Zaistniała realna możliwość poznawania losów materii w rozszerzającym się Wszechświecie, w epokach obejmujących kosmiczne skale czasu. Możliwa stała się ekstrapolacja wstecz. Można zatem sformułować następującą ogólną prawidłowość: w miarę cofania się w czasie materia ujawnia swe coraz prostsze składniki. Wierzmy, że w miarę wzrostu energii, możliwa staje się unifikacja sił Przyrody.

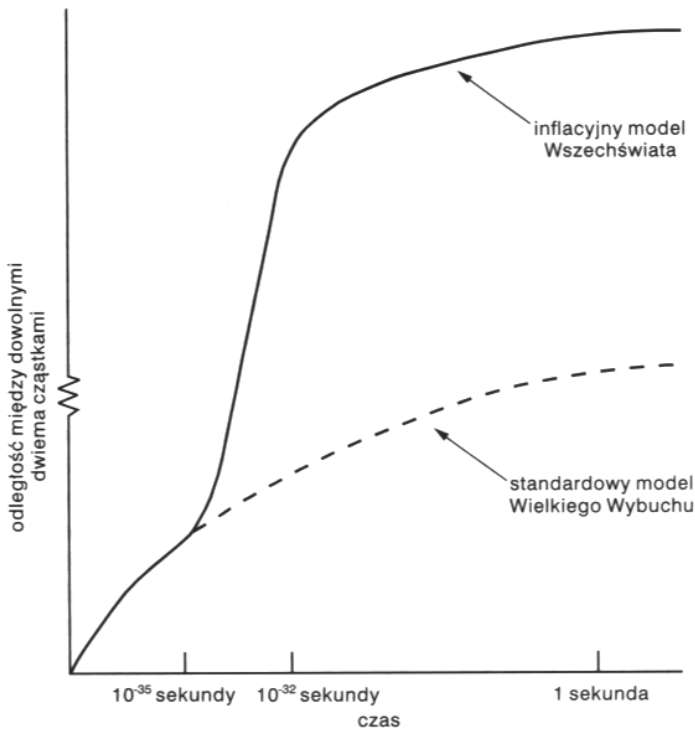
4. Jak można zrozumieć epokę Wielkiego Wybuchu?

Bardzo często w literaturze popularnonaukowej wypowiada się zdanie, „że „Nasz Wszechświat powstał w wyniku Wielkiego Wybuchu około 15 miliardów lat temu”. Dla wygody przemilcza się tu fakt, iż Wszechświat w tamtym momencie miał rozmiary o wiele mniejsze od rozmiaru atomu! Próbując zrozumieć takie zjawisko, ekstrapolujemy teorię grawitacji Einsteina i modele kosmologiczne na niej oparte do bardzo małych rozmiarów. Jednak fizykę mikroświata trzeba wyrażać językiem mechaniki kwantowej [10].

Klasyczna teoria Wielkiego Wybuchu jest zainfekowana dwiema „chorobami”. Pierwsza znana jest jako problem płaskości Wszechświata. Drugim problemem klasycznej teorii Wielkiego Wybuchu jest problem horyzontu.

Zgodnie z modelami inflacyjnymi (rys. 1) obecny okres rozszerzania się Wszechświata poprzedzony był bardzo krótką, lecz decydującą fazą niewyobrażalnie szybkiej ekspansji – fazą inflacji. Rozmiary Wszechświata mogły podwajać się wówczas co 10^{-35} s i w rezultacie gwałtownego „nadmuchiwania”, przez kilkaset takich podwojeń, powstał płaski Wszechświat. Sto podwojeń oznacza powiększenie wszystkich rozmiarów 10^{30} razy, czyli tyle, że z jądra atomowego powstać może obszar wielkości Galaktyki. Cały obserwowany obecnie Wszechświat brałby swój początek z jednego obszaru o wyrównanej temperaturze, który potem gwałtownie się powiększył. Obserwowana izotropowość promieniowania tła byłaby wytłumaczona.

Przyczyną inflacji miałyby być efekt odpychania wywołany energią próżni kwantowej, prowadzący do takich samych skutków jak wprowadzenie stałej kosmologicznej. Dla Einsteina stała kosmologiczna była kłopotliwym dodatkiem. W teoriach kwantowych jej pojawienie się można uzasadnić fizycznie, co zauważył już w 1967 roku rosyjski fizyk Jakow B. Zeldowicz. W teorii kwantowej próżnia wypełniona jest energią i stała kosmologiczna jest proporcjonalna do gęstości energii próżni.



Rys. 1. Idea Wszechświata inflacyjnego

Jaki mechanizm mógł spowodować inflację Wszechświata? Wszystkie teorie cząstek elementarnych tłumaczące mechanizm inflacji Wszechświata opierają się na pojęciu próżni kwantowej. Przy analizie fizycznego mechanizmu inflacji Wszechświata korzystamy więc z pojęcia próżni. Może ona mieć różne stany. Energia próżni odróżnia te stany od siebie. W scenariuszu inflacyjnym zakłada się, że ewolucja Wszechświata zaczęła się od stanu próżni, który nie miał najniższej energii. Stąd nazywa się go czasem „próżnią fałszywą”. Można wykazać, że pusta, ale „fałszywa próżnia” Wszechświata, ewoluuje zgodnie z równaniami Einsteina jak „materia”, ale o bardzo dziwnych właściwościach. Ciśnienie „fałszywej” próżni jest ujemne, a grawitacja odpychająca! To właśnie odpychająca

gravitacja „fałszywej próżni” odpowiedzialna jest za rozdęcie, czyli inflację Wszechświata. Stan taki trwał jedynie do momentu przekroczenia pewnej temperatury zwanej temperaturą krytyczną. W tym momencie nastąpiło przejście fazowe: „skroplenie próżni”, czyli przejście do stanu próżni „prawdziwej” o najniższej energii. Z wydzielonej przy tym energii powstała potem – jak się uważa – obserwowana obecnie materia i promieniowanie.

Gwałtowne rozszerzanie się Wszechświata wygładziło niejednorodności i zgęszczenia. Obserwowany Wszechświat jest jednorodny i izotropowy. Inflacja zmusiła Wszechświat do rozszerzania się w ściśle określony sposób, zgodnie z tempem ekspansji modelu płaskiego.

W naturalny sposób pojawiło się wyjaśnienie problemu horyzontu: mówiąc obrazowo, w czasie inflacji został on „wypchnięty” daleko poza obserwowaną część Wszechświata. Dlatego też poszczególne punkty na niebie mają tę samą temperaturę; wszystkie one należą w scenariuszu inflacyjnym do obszaru powiązanego przyczynowo.

Inflacja jest falsyfikowana i weryfikowalna. W przypadku naszego Wszechświata mamy do czynienia z kilkoma szczególnymi koincydencjami. Jest on jednorodny (taki sam w każdym punkcie) oraz izotropowy (taki sam w każdym kierunku). Pomiar temperatury i natężenia mikrofalowego promieniowania tła dowodzi izotropii jego rozkładu na niebie; niesie ono „zamrożoną” informację o samym Wszechświecie z czasów, gdy po raz ostatni oddziaływało z materią, czyli około 380 000 lat po Wielkim Wybuchu. Ponadto obserwowany Wszechświat jest płaski.

Literatura

- [1] H. Drozdowski, *W poszukiwaniu wielkiej syntezy*, [w:] *Wokół Einsteina. Dylematy filozofów i fizyków*, 161-168, redakcja naukowa: Zdzisław Błaszczak, Antoni Szczuciński, Oficyna Wydawnicza Batik, Poznań 2009.
- [2] S.W. Hawking, *Krótką historia czasu*, Wydawnictwo Zysk i S-ka, Poznań 1996.
- [3] S.W. Hawking, *Teoria wszystkiego*, Wydawnictwo Zysk i S-ka, Poznań 2003.
- [4] H. Drozdowski, *Fizyczny Obraz Świata*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 2007.
- [5] R. Jastrow, M. Rampino, *Origins of life in the Universe*, University Press, Cambridge 2008; M.G. Edmunds, *The origin of the elements of life*, *Europhysics News*, **33** (2), 41-44 (2002).
- [6] F. Leblanc, *An Introduction to Stellar Astrophysics*, Wiley, A John Wiley & Sons 2010.
- [7] B.R. Martin, *Nuclear and Particle Physics*, Wiley, A John Wiley & Sons 2009.
- [8] H. Drozdowski, *Interdyscyplinarność w nauczaniu fizyki współczesnej*, [w:] *Jak nauczać fizyki w XXI wieku?*, 155-160, Wyd. UAM, współfinansowanie ze środków Unii Europejskiej EFS, Poznań 2011.

- [9] G. Smoot, K. Davidson, *Narodziny Galaktyk*, Wydawnictwo CIS, Warszawa 1996.
- [10] H. Drozdowski, *Kwantowe powstanie Wszechświata*, wykład na XL Zjeździe Fizyków Polskich, *Book of Abstracts, 40th General Meeting of Polish Physicists*, 153, Kraków, 6-11.09.2009.