



CO SPADA NA GŁOWĘ

Nie wszystko, co niebo nam przynosi, jest miłe. Obawiając się spadających na Ziemię komet czy meteorytów, pamiętajmy, że część tego, co przybywa do nas z kosmosu, może być źródłem wielkich odkryć.



THE VIRGO COLLABORATION/CCO.LO / WWW.LIGO.CALTECH.EDU

dr Wojciech A. Hellwing

Centrum Fizyki Teoretycznej
Polska Akademia Nauk, Warszawa

Tym, co w postaci promieniowania, strumienia różnych cząstek oraz fal grawitacyjnych dociera do nas z przestrzeni kosmicznej, zajmuje się astrofizyka cząstek lub jak kto woli fizyka astrocząstek. W Polsce i na świecie ta dziedzina przeżywa ostatnio niespotykany rozkwit, który jest głównie napędzany olbrzymim postępem w technikach obserwacyjnych, jaki dokonał się w ostatnich latach. Ta stosunkowo

młoda dyscyplina została wyróżniona w ostatnich kilku dekadach wieloma Nagrodami Nobla.

Współczesna astrofizyka cząstek to multidyscyplinarna dziedzina łącząca wiedzę współczesnej fizyki, astrofizyki i kosmologii. Zakres skal obiektów i zjawisk fizycznych, które bada, jest imponujący: od długości Plancka i jektosekund, które opisywały zjawiska z początków kosmosu, do gigaparseków promienia obserwowanego Wszechświata i miliardów lat jego istnienia. Dodajmy, że gigaparsek to miliard parseków; sam parsek to jednostka długości używana w astronomii, przy czym $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ roku świetlnego} = 3,08 \times 10^{16} \text{ metrów}$.

Astrofizyka cząstek nie jest znowu aż taka nowa: aż do lat 60. XX w. fizyka promieniowania kosmicznego to była w zasadzie właśnie astrofizyka cząstek. Cała fizyka cząstek elementarnych uprawiana obecnie za pomocą doświadczeń w ziemskich akceleratorach wyrosła z badań nad cząstkami elementarnymi i procesami z ich udziałem, jakie manifestują się w promieniowaniu kosmicznym. Promieniowanie kosmiczne to promieniowanie złożone z fal EM, szybko poruszających się cząstek elementarnych i jąder atomowych oraz fal grawitacyjnych docierające do Ziemi z otaczającej przestrzeni kosmicznej. To właśnie badania astrocząstek i ich interakcji z atomami atmosferycznymi doprowadziły do odkrycia pierwszych cząstek antymaterii (pozytonów) oraz pierwszych znanych leptonów drugiej generacji (mionów).

Nawet dzisiaj, gdy największe odkrycia – jak np. znalezienie bozonu Higgsa – dokonują się za pomocą wielkich naziemnych urządzeń takich jak wielki zderzacz hadronów w CERN pod Genewą, to wciąż promieniowanie kosmiczne pozwala nam badać zjawiska o najwyższych energiach. Energia niektórych cząstek wpadających w atmosferę ziemską dochodzi do prawie 450 TeV i wciąż jest znacznie większa niż ta dostępna w zderzeniach w LHC.

O ile badania promieniowania kosmicznego i fizyka cząstek elementarnych od początku szły w parze, to już związek pomiędzy kosmologią i fizyką cząstek został rozpoznany znacznie później. Po odkryciu przez Hubble'a ucieczki galaktyk i sformułowaniu później teorii Wielkiego Wybuchu stało się jasne, że w historii Wszechświata był okres, kiedy był on bardzo mały i ekstremalnie gorący. W tym pierwotnym stanie Wszechświat w zasadzie był kwantowym mikrokosmosem, którego własności i ewolucję opisują prawa mechaniki kwantowej i fizyki cząstek elementarnych. Obecnie w wielu naziemnych akceleratorach cząstek fizycy starają się odtworzyć warunki, jakie panowały w młodym i gorącym Wszechświecie. Używa się do tego kolizji wysokoenergetycznych wiązek proton-antyproton i elektron-pozyton, by symulować swoiste „miniaturowe Wielkie Wybuchy”. Jednakże ultrawysokich temperatur i energii, jakie panowały niedługo po Wielkim Wybuchu, nigdy nie uda się osiągnąć w żadnym ziemskim laboratorium. Toteż symbioza



Dr Wojciech A. Hellwing

jest kosmologiem. Pracę doktorską napisał pod kierunkiem prof. Romana Juszkiewicza obronił w 2010 r. w Centrum Astronomicznym PAN im. M. Kopernika. Pracował m.in. w Instytucie Kosmologii i Grawitacji w Portsmouth, na Uniwersytecie w Durham oraz w ICM UW; członek zarządu Polskiego Towarzystwa Astronomicznego.

hellwing@cft.edu.pl

fizyki cząstek elementarnych, astronomii i kosmologii jest jedynym naturalnym kierunkiem rozwoju badań. Tak narodziła się współczesna astrofizyka cząstek.

Sukcesy i wyzwania

Droga do współczesnej symbiozy fizyki cząstek, wysokich energii, astrofizyki i kosmologii była długa i obfitowała w wiele zaskakujących odkryć. Niektóre z tych odkryć ustanowiły prawdziwe kamienie milowe w naszym myśleniu o fizycznym Wszechświecie. Wielokrotnie okazywało się, że to, co skrywa się w przepastnych czeluściach głębokiego kosmosu, a co daje nam o sobie znać, wysyłając różne cząstki i promieniowanie docierające na Ziemię, jest tak dziwne i niesamowite, że przekracza wyobrażenia najśmielszych pisarzy SF, nie wspominając nawet o fizykach.

Badania różnych źródeł promieniowania kosmicznego przyniosły nam odkrycia obiektów takich jak np. kwazary, najjaśniejsze długo świecące obiekty znane ludzkości. Jasności absolutne kwazarów dorównują jasności łącznej bilionów Słońc. Tylko niektóre wybuchy gwiazd supernowych przez krótką chwilę potrafią świecić jaśniej. Jednak kwazary świecą tak jasno przez miliony lat. Astrofizyka cząstek dała nam też rozwiązanie zagadki świecenia kwazarów. Mechanizmem odpowiedzialnym za ich olbrzymią jasność jest akrecja materii na supermasywną czarną dziurę. Odkrycie innych obiektów, też świecących w zakresie radiowym, czyli pulsarów, doprowadziło do rozwoju nowej gałęzi wiedzy – elektrodynamiki relatywistycznej, która zajmuje się badaniami szybko rotujących i mocno namagnetyzowanych gwiazd neutronowych. Zarówno kwazary, jak i pulsary były sporym zaskoczeniem, jednak to rozwiązanie problemu anomalii neutrin atmosferycznych i słonecznych należy bez wątpienia do największych osiągnięć astrofizyki cząstek. Anomalią był tutaj zagadkowy deficyt neutrin słonecznych w docierającym do Ziemi strumieniu, w porównaniu z tym, co przewidywały obliczenia teoretyczne. Ostatecznie okazało się, że żadne z postulowanych egzotycznych rozwiązań proponowanych przez społeczność naukową nie jest poprawne. Rozwiązaniem zagadki okazało się jedno z najbardziej fascynujących zjawisk, a mianowicie oscylacje neutrinowe – zjawisko, które teoretycznie przewidział Bruno Pontecorvo, a którego istnienie implikowało fakt, że neutrina mają niezerową masę.

Badania i obserwacje, którymi zajmuje się astrofizyka cząstek, przyniosły nam jeszcze wiele innych wspaniałych odkryć. Warto tu jeszcze wymienić odkrycie rozbłysków gamma, testy doświadczalne ogólnej i szczególnej teorii względności (np. za pomocą mionów z promieniowania kosmicznego), pomiary kosmicznego promieniowania tła (Nagroda Nobla za misję COBE), odkrycie przyspieszonej ekspansji Wszechświata (Nagroda Nobla za obserwacje odległych gwiazd supernowych). Chyba największym

obecnie blaskiem świecą odkrycia z ostatnich dwóch lat poczynione przez zespoły LIGO i VIRGO, a dotyczące fal grawitacyjnych pochodzących od zlewających się czarnych dziur i gwiazd neutronowych.

Tegoroczna Nagroda Nobla w fizyce została przyznana trzem fizykom, których wieloletnia praca i badania doprowadziły do powstania amerykańskiego obserwatorium Advanced LIGO i jego europejskiego partnera VIRGO. Nobel dla Kipa Thorne'a, Rainera Wiessa i Barry'ego Barisha związany jest z pierwszym bezpośrednim pomiarem przejścia fali grawitacyjnej przez ziemskie laboratorium. 14 września 2015 r. oba interferometry laserowe systemu LIGO zarejestrowały sygnał fal grawitacyjnych, który został wyemitowany przez zlewające się dwie czarne dziury. Charakterystyka, długość i kształt sygnału doskonale zgadzały się z tym, co przewiduje teoria grawitacji Einsteina w przypadku takich zjawisk. Tak oto prawie 100 lat po ogłoszeniu przez Alberta Einsteina ogólnej teorii względności jej najbardziej egzotyczne przewidywanie, czyli istnienie fal grawitacyjnych, zostało w końcu potwierdzone przez bezpośredni pomiar w laboratorium. W ten sposób narodziła się nowa XXI-wieczna dyscyplina: astronomia fal grawitacyjnych. Zdarzenie z 14 września 2015 r. okazało się zwiastunem nadchodzącej fali wspaniałych odkryć [czytaj również *Academia* nr 1 (45) 2016]. Do dzisiaj udało się zarejestrować sygnały od łącznie czterech takich zjawisk.

Pierwsza rejestracja fal grawitacyjnych na Ziemi była przełomowa, jednak kilka miesięcy temu obserwatoria LIGO/VIRGO zarejestrowały sygnał od jeszcze bardziej niesamowitego zjawiska. 17 sierpnia 2017 r. udało się po raz pierwszy zmierzyć sygnał od dwóch zderzających się gwiazd neutronowych (zdarzenie GW170817). Zderzenia gwiazd neutronowych są o wiele bardziej ekscytujące dla fizyków, gdyż w odróżnieniu do czarnych dziur gwiazdy neutronowe zbudowane są z materii atomowej, która emituje również fale elektromagnetyczne. Rzeczywiście dziesiątki różnych obserwatoriów na naszej planecie i jej orbicie, zaalarmowane sygnałem z LIGO/VIRGO skierowały swoje czujne oczy w kierunku galaktyki NGC 4993, skąd zdawał się dochodzić sygnał grawitacyjny. Przynajmniej badacze wykryły nowe przejściowe źródło promieniowania, które można było jednoznacznie utożsamić ze źródłem sygnału grawitacyjnego. Tak oto pierwszy raz udało się zaobserwować poświatę kilonowej. Kilonowa to zjawisko przewidziane teoretycznie, gdzie zderzeniu i połączeniu ulegają dwie gwiazdy neutronowe, a wydarzeniu towarzyszy emisja promieniowania na wszystkich długościach fal. Pomiary opóźnienia w stosunku do fal grawitacyjnych, z jakim na Ziemię dotarło promieniowanie gamma z poświaty kilonowej GW170817, pozwoliły na wyznaczenie prędkości grawitacji i światła z dokładnością przebijającą o wiele rzędów wielkości wszystkie inne pomiary tego typu w całej wcześniejszej historii. Tak

C Z Ą S T K I

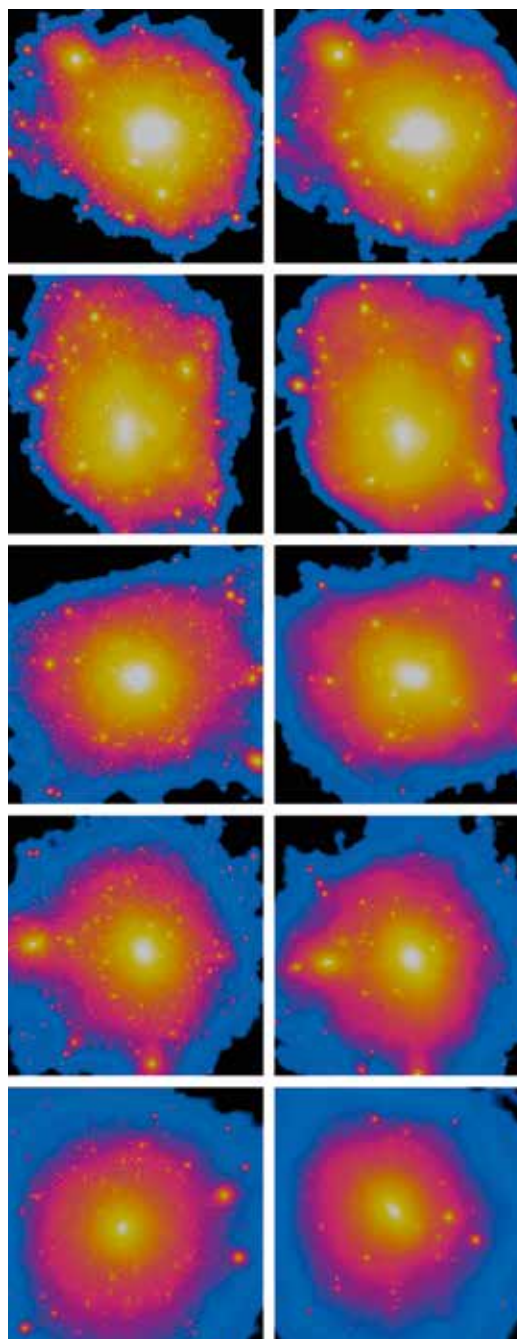
oto narodziła się jeszcze kolejna dyscyplina naukowa: astronomia wielozakresowa.

Powyższe pobieżne wyliczenie wielkich odkryć, jakie „spadły na nas z nieba”, pokazuje, że astrofizyka cząstek dzięki rzadko spotykanej w innych dziedzinach synergii pomiędzy dyscyplinami, zdawałoby się, tak odległymi jak kosmologia, astronomia, fizyka wysokich energii i cząstek elementarnych ma przed sobą równie ekscytującą przyszłość.

Przyszłość pełna odkryć

Fizyka, astrofizyka i kosmologia XXI w. stoją w obliczu największych wyzwań, jakie nauka i przyroda postawiły przed ludzkością. Nierozwiązane pozostają zagadki fizycznej natury ciemnej materii i ciemnej energii, tajemniczych składników Wszechświata, z których pierwszy odpowiedzialny jest za powstanie wielkoskalowej struktury Wszechświata i galaktyk się w niej znajdujących, drugi zaś odpowiada za przyspieszoną ekspansję Wszechświata. Poszukiwania cząstki elementarnej – budulca ciemnej materii oraz ewentualnych produktów jej rozpadu lub anihilacji, to jeden z głównych tematów badań astrofizyków cząstkowych i kosmologów. Nowe okno na Wszechświat, jakie otworzyły nam fale grawitacyjne razem z badaniami nad procesami emisji i jej zmienności wysokoenergetycznego promieniowania kwazarów i galaktyk aktywnych, pozwoli na jeszcze ściślejsze, i niezależne od wcześniejszych, pomiary parametrów kosmologicznych. Nowe pomiary z kolei rzucą trochę światła na problem ciemnej energii, co umożliwi nam lepszy wgląd w jej tajemniczą naturę. Jakie zagadki kryją dla nas w zanadru nowe i żywo rozwijające się dyscypliny takie jak astronomia neutrinowa i twardych promieni gamma, możemy tylko przypuszczać. Obserwacje kosmicznych neutrin pozwoli nam m.in. na lepsze poznanie procesów wybuchów gwiazd supernowych, jak to już miało miejsce w przypadku supernowej 1987A, która wybuchła w Wielkim Obłoku Magellana. Badania wysokoenergetycznych fotonów gamma dadzą nam zaś wgląd w fizykę egzotycznych wysoko energetycznych procesów w przyrodzie, takich jak kilonowe, kolapsary i hipernowe. Analizy pierwotnych i wtórnych wielkich pęków atmosferycznych nie tylko przyczynią się do lepszego poznania odległych źródeł promieniowania kosmicznego, lecz również są drogą do testów i rozwoju standardowego modelu cząstek elementarnych. Dodajmy, że pęki atmosferyczne to kaskady cząstek i fotonów, które powstają, gdy w ziemską atmosferę wleci wysokoenergetyczna cząstka promieniowania kosmicznego. Tym zjawiskom towarzyszy zazwyczaj promieniowanie Czerenkowa, które jest rejestrowane przez naziemne obserwatoria optyczne – teleskopy Czerenkowa.

Poszukiwania śladów podwójnego bezneutrinowego rozpadu beta czy fotonów gamma o teraelektronowoltowych (TeV) energiach wśród śladów po kaskadach atmosferycznych mogą dać kolejne przełomowe odkrycia.



Symulacje komputerowe: formowanie się układu Galaktyki Drogi Mlecznej w dwóch różnych modelach ciemnej materii.

Na str. 39:
Obserwatorium VIRGO.

To prawda, że nie wszystko, co nam spada z nieba na głowę, jest dla nas przyjemne. Niegdyś ludzkość przerażała złowróbnymi kometami czy meteorami, jeszcze niedawno obawialiśmy się dziury ozonowej i promieni UV. Niewielu z nas zapewne zachwyca się lecącym na głowę gradem czy lodowatym deszczem. Jednak historia wielkich odkryć astrofizyki cząstek, i jej przyszłość sugeruje, że zamiast z trwogą czy lękiem powinniśmy raczej wpatrywać się w niebo z nadzieją, że dostarczy nam wiedzy o Wszechświecie i jego zjawiskach.

WOJCIECH A. HELWING

Chcesz wiedzieć więcej?

Sownak B., Hellwing W. A., Frenk C. S., Jenkins A., Lovell M. R., Helly J. C., Li B., Gonzalez-Perez V., Gao L. (2017). Substructure and galaxy formation in the Copernicus Complexio warm dark matter simulations. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 464 no.4, 4520-4533.

Bose B., Hellwing W. A., Frenk C. S., Jenkins A., Lovell M. R., Helly J. C., Li B. (2016). The Copernicus Complexio: Statistical Properties of Warm Dark Matter Haloes. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 455 no.1, 318-333.