



ASTRONOMIA i FIZYKA – stosunki doskonałe, czy raczej stulecia wzajemnych, coraz bardziej kłopotliwych pytań?¹

Kazimierz Grotowski

Instytut Fizyki UJ

Astronomia i fizyka różnią się znacznie datami narodzin. Początki astronomii sięgają czasów starożytnych. Chińczycy wykonywali pomiary nachylenia ekliptyki do równika Ziemi już ponad 3 tysiące lat temu. Gwiazdozbiory były identyfikowane już w rocznikach chińskich i napisach asyryjskich, a **Hipparcos** opracował pierwszy katalog gwiazd już w II wieku przed narodzeniem Chrystusa. Wprawdzie w rozważaniach filozofów na temat atomistycznej budowy materii na przełomie V i IV w. p.n.e. można się dopatrywać początków fizyki, a od **Pitagorasa** pochodzą pierwsze związki fizyki z matematyką, ale naprawdę fizyka narodziła się znacznie później i to w dużej mierze w wyniku pytań stawianych przez astronomię.

ASTRONOMIA – **Kopernik** pokazał, że: *planety krążą wokół Słońca*.

FIZYKA – aby wyjaśnić: *bo działa prawo powszechnego ciężenia i prawa dynamiki*, **Galileusz**, **Kepler**, **Newton** musieli poczynić swoje odkrycia (XVI–XVIII wiek n.e.) tworząc podwaliny współczesnej fizyki.

Aż do końca XIX wieku astronomia z powodzeniem korzysta z rodzących się kolejno działów fizyki: dynamiki, termodynamiki, optyki, elektrodynamiki. Pierwsze poważniejsze trudności pojawiają się pod koniec stulecia.

ASTRONOMIA znowu stawia pytanie: *Czemu Słońce i gwiazdy świecą?*

FIZYKA – ma blisko pół wieku trudności z odpowiedzią na to pytanie. Niezbędne w tym celu, mechanika kwantowa, fizyka atomowa i jądrowa mają się dopiero narodzić w XX wieku. Dzisiaj wiemy, że *we wnętrzach gwiazd i Słońca zachodzą termojądrowe reakcje fuzji, które spalają wodór na hel i cięższe pierwiastki. Odpowiedzialne za to łańcuchy reakcji wypisuje Hans Bethe w 1939 roku, a dokładny opis tych zjawisk pojawia się dopiero w latach pięćdziesiątych.*

W 1911 roku **Albert Einstein** publikuje pierwszą pracę z **ogólnej teorii względności**. W dużym przybliżeniu jej sens można streścić następująco: *Materia (grawitacja) zakrzywia przestrzeń. Według mechaniki newtonowskiej swo-*

¹ Powyższy tekst jest rozszerzeniem wykładu, który autor wygłosił na Konwersatorium Fizycznym w Instytucie Fizyki UJ, Kraków 2005.

bodne cząstki i światło powinny poruszać się po liniach prostych; według ogólnej teorii względności będą to tory zakrzywione. Jest to bardzo rewolucyjna idea!

Teraz **FIZYKA** ustami Alberta Einsteina stawia przed **ASTRONOMIĄ** problem:

„Byłoby rzeczą pilnie pożądaną, aby zagadnieniem tym zainteresowali się astronomowie i to nawet w przypadku, gdyby przytoczone tu rozważania wydały się niedostatecznie uzasadnione czy wręcz awanturnicze.”

Ale wybucha I wojna światowa i odpowiedź na to pytanie nadchodzi dopiero po ośmiu latach. Jest nią obserwacja zaćmienia Słońca, wykonana 29 maja 1919 roku przez zespół **A. Eddingtona**. *Zakrzywienie przestrzeni wokół Słońca powoduje odchylenie promienia światła, pochodzącego od gwiazdy ukrytej tuż za krawędzią jego tarczy, o $1,98 \pm 0,16''$ (sekundy katowej).*

Zakrzywienie przestrzeni wpływa oczywiście również na ruch ciał materialnych. Peryhelium Merkurego przesuwają się w ciągu 100 lat o $573''$ (**Leverrier** XIX w.). Newtonowska mechanika, po uwzględnieniu perturbacji od innych planet przewiduje tylko $530''$. A więc 43 sekundy katowe na stulecie to poprawka pochodząca od ogólnej teorii względności. Są to bardzo małe efekty które na początku XX w. mogły się wydawać bez znaczenia.

Spokój astronomów zakłóciła dopiero sensacyjna wiadomość o pomiarze wykonanym przez **E. Hubble'a** w 1929 roku za pomocą teleskopu na Mount Wilson. Linie widmowe światła galaktyk są przesunięte ku czerwieni i to tym bardziej, im bardziej galaktyki są od nas odległe. Hubble interpretuje swą obserwację jako klasyczny efekt Dopplera. Galaktyki uciekają od nas z prędkością v proporcjonalną do ich odległości r :

$$v = H r, \quad H - \text{stała Hubble'a.} \quad (1)$$

Wszystkie galaktyki uciekają od nas i to tym szybciej im bardziej są odległe!!!

Interpretacja obserwacji Hubble'a budziła wiele protestów. Burzyła bowiem niektóre kanony astronomii. Pomiar Hubble'a był wielokrotnie sprawdzany, a wartość stałej Hubble'a ustalono z zadawalającą dokładnością dopiero po blisko 30 latach. Przyjęta dzisiaj wartość: $H \approx 22 \text{ km/s/milion lat świetlnych}$.

ASTRONOMIA: *Jak to jest możliwe??? Czemu galaktyki właśnie od nas uciekają? To przeczy zasadzie kosmologicznej, że obserwowany z dowolnego punktu Wszechświat powinien być taki sam! Co z niezmiennością Wszechświata w czasie?*

W tym przypadku **FIZYKA** była w stanie natychmiast udzielić na to pytanie odpowiedzi. Potrzebnych narzędzi należało szukać właśnie w **ogólnej teorii względności**.

Przyjmijmy, że w odpowiednio dużej skali Wszechświat jest jednorodnie wypełniony materią. Obserwacje astronomiczne rozkładu galaktyk we Wszech-

świecie dopuszczają takie założenie. Od średniej gęstości materii Wszechświata zależy, jak bardzo czasoprzestrzeń jest zakrzywiona i jaka jest geometria przestrzeni. Pole grawitacyjne tej materii, które określa geometrię Wszechświata, wylicza się z równań Einsteina²:

$$G_{\mu\nu} = (c^{-4}) 8\pi GT_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} \Lambda, \quad \mu, \nu \rightarrow 0, 1, 2, 3 \quad (2)$$

gdzie poszczególne symbole oznaczają:

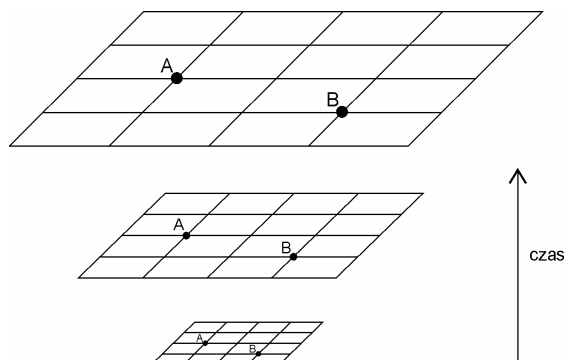
- $G_{\mu\nu}$ – tensor Einsteina
- G – stała grawitacji
- $g_{\mu\nu}$ – tensor metryczny
- Λ – tzw. stała kosmologiczna
- $T_{\mu\nu}$ – tensor energii, pędu
- c – prędkość światła

Aby znaleźć pole grawitacyjne, trzeba rozwiązać układ 10 równań różniczkowych nieliniowych drugiego rzędu. Każde zawiera bardzo wiele wyrazów. Jak mówiliśmy, ogólna teoria względności przewiduje wpływ grawitacji na geometrię przestrzeni. Aby zrozumieć jak opisać rozszerzający się Wszechświat wyobraźmy sobie nieskończoną przestrzeń, a w niej dwa obiekty, A i B, np. dwie galaktyki. Dla prostoty niech to będzie przestrzeń dwuwymiarowej płaszczyzny (np. membrana), która będzie się rozszerzać. Współporuszające się z rozszerzającą się płaszczyzną współrzędne obiektów A i B oznaczmy symbolami (x_A, y_A) i (x_B, y_B) . Odległość $l_{AB}(t)$ obiektów A i B w funkcji czasu t , będzie ogólnie biorąc dana wyrażeniem:

$$l_{AB}(t) = R(t)[(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2]^{1/2}, \quad (3)$$

gdzie $R(t)$, kosmiczny czynnik skali, może być zależny od czasu t . Dla chwili obecnej, $t = t_0$, przyjmujemy $R(t_0) = 1$. Oczywiście, odległość AB w rzeczywistej, trójwymiarowej przestrzeni będzie w zależności od jej geometrii dana innymi, nieco bardziej skomplikowanymi wzorami, również zawierającymi kosmiczny czynnik skali $R(t)$. Wprowadzenie do równania (3) czynnika skali umożliwia rozszerzanie lub kurczenie się przestrzeni Wszechświata. Jeśli przestrzeń się rozszerza to galaktyki od nas uciekają, a długość fali obserwowanej linii światła wydłuża się proporcjonalnie do kosmicznego czynnika skali. I to daje kosmiczny efekt Dopplera (rys. 1).

² Od Redakcji: Zdecydowaliśmy się zademonstrować *in extenso* słynne równania Einsteina pomimo iż wiemy, że dla wielu czytelników w takiej postaci będą one jedynie ikoną jednej z najważniejszych teorii fizyki teoretycznej. Równania te wiążą (lewa strona) własności geometryczne opisane tensorem $G_{\mu\nu}$ z materią – prawa strona równania.



Rys. 1. Rozszerzająca się przestrzeń Wszechświata

Układ równań Einsteina może mieć wiele rozwiązań. Niełatwo znaleźć to z nich, które ma sens fizyczny i właściwie oddaje postać funkcji $R(t)$. Zrobili to, niezależnie od siebie, w latach dwudziestych XX wieku, **Aleksander Friedman** i **Georges Lemaître**. Było to przed pomiarem wykonanym przez Hubble'a i większość fizyków nie zwróciła na ich prace uwagi. Mówiąc nawiasem, w zgodzie z ówczesnymi poglądami Einstein uważał, że Wszechświat jest statyczny, w kosmicznej skali niezależny od czasu. Aby to uzyskać musiał wprowadzić do równań (2) stałą kosmologiczną Λ i odpowiednio dobrać jej wartość. Pomiary Hubble'a przekonały go do zerowej wartości Λ , a jej wprowadzenie nazwał Einstein swym *największym błędem*. Jak zobaczymy dalej, nie miał racji.

Kładąc $\Lambda = 0$ Friedman i niezależnie Lemaître otrzymali równania różniczkowe, które dzisiaj zapisujemy w postaci:

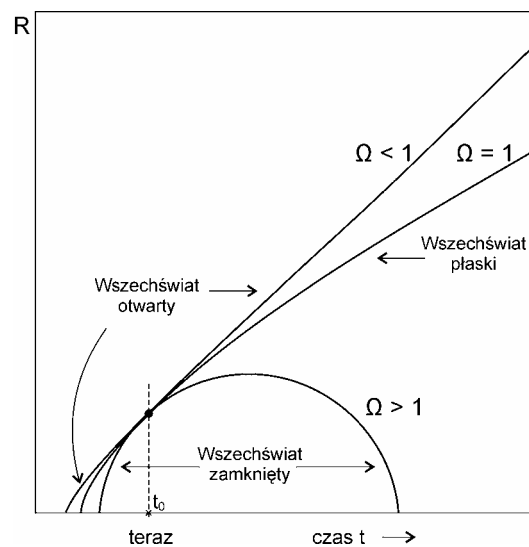
$$\left(\frac{dR(t)}{dt}\right)^2 + kc^2 = \frac{8}{3}\pi G \rho(t) R(t)^2, \quad (4)$$

$$c^2 \frac{d}{dt}(\rho(t) R(t)^3) + p \frac{d}{dt}(R(t)^3) = 0. \quad (5)$$

Występują w nich: gęstość materii we Wszechświecie – $\rho(t)$, oraz ciśnienie gazu (cieczy) – p , wypełniającego Wszechświat, od których zależy równanie stanu oraz k – parametr krzywizny. Początkowo, tuż po Wielkim Wybuchu, była to gorąca energia lub plazma cząstek elementarnych. Dzisiaj jest to raczej „pył”, którego ziarnami są galaktyki. Równania te pozwalają śledzić przebieg rozszerzania się Wszechświata.

Niech $\rho(t)/\rho_{kr}(t) = \Omega_0$, gdzie tzw. gęstość krytyczna $\rho_{kr}(t) = \frac{3H(t)^2}{8\pi G}$. Dla rozszerzającego się Wszechświata wartość stałej Hubble'a H , musi zależeć od czasu, a we wzorze (1) należy dopisać $H(t_0) = H_0$, gdzie, jak mówiliśmy, t_0 znaczy – dzisiaj. W chwili obecnej $\rho_{kr}(t_0) \approx 2 \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$.

Wielkość parametru Ω_0 decyduje o geometrii przestrzeni Wszechświata:
 jeśli $\Omega_0 > 1$ to $k > 0$, czyli przestrzeń ma krzywiznę dodatnią (jej dwuwymiarowym odpowiednikiem jest powierzchnia kuli),
 jeśli $\Omega_0 = 1$ to $k = 0$ i przestrzeń jest płaska (geometria euklidesowa),
 jeśli $\Omega_0 < 1$ to $k < 0$ i przestrzeń ma krzywiznę ujemną (jej dwuwymiarowym odpowiednikiem jest np. powierzchnia siodła – patrz rys na str. 23).



Rys. 2. Różne scenariusze ekspansji Wszechświata

Rysunek 2 pokazuje, jak wg równań Friedmana-Lemaître'a zmienia się kosmiczny czynnik skali $R(t)$, czyli jak we Wszechświecie zmieniają się odległości galaktyk (gromad galaktyk). Widzimy, że prędkość rozszerzania się Wszechświata maleje w czasie. Jest to wynik przyciągającego działania grawitacji. Dla płaskiej geometrii ($\Omega_0 = 1$) i dla krzywizny ujemnej ($\Omega_0 < 1$), Wszechświat będzie się zawsze rozszerzał. Dla krzywizny dodatniej ($\Omega_0 > 1$) grawitacja w pewnym momencie zwycięży i Wszechświat zacznie się kurczyć. Rys. 2 pokazuje również, że początek skali czasu, a z nią wartość t_0 , czyli wiek Wszechświata, zależą od geometrii Wszechświata, czyli od wartości Ω_0 . Jednocześnie **rys. 2 sygnalizuje FIZYCE poważny kłopot**. Widzimy, że dla $t = 0$ (początek skali czasu) rozmiary Wszechświata były zerem. Wszechświat był punktem geometrycznym, którego masa (energia) musiała być nieskończona. Taką sytuację nazywamy „osobliwością”. Sygnalizuje ona, że znane prawa fizyki przestają tutaj działać. Nie wiadomo również co spowodowało „Wielki Wybuch”, który wyprowadził Wszechświat z „osobliwości”. Drugiej „osobliwości” należy oczekiwać dla przypadku $\Omega > 1$ i odpowiednio długiego czasu, po którym przestrzeń Wszechświata zbiegnie się do punktu.

Wynikające z ogólnej teorii względności równania Friedmana-Lemaître'a i ich konsekwencje, zostały przyjęte przez astronomów z niedowierzaniem.

ASTRONOMOWIE pytają: *Czy poza „ucieczką” galaktyk znane są inne przesłanki popierające hipotezę Wielkiego Wybuchu?*

FIZYKA była w stanie odpowiedzieć na to pytanie dopiero kilkadziesiąt lat później.

Spektroskopowe pomiary, wykonywane przez astronomów, oraz inne dowody obserwacyjne ukazują, że we Wszechświecie mamy ok. 75% wodoru, 24% helu, a na resztę pierwiastków przypada tylko ok. 1%. Zwolennicy stacjonarnego Wszechświata uważali, że wszystkie pierwiastki produkowane są wewnątrz gwiazd. Innego zdania byli zwolennicy Wielkiego Wybuchu. Na przełomie lat czterdziestych i pięćdziesiątych twierdzili oni, że wszystkie pierwiastki narodziły się w Wielkim Wybuchu z pierwotnej gorącej „zupy” neutronów i protonów.

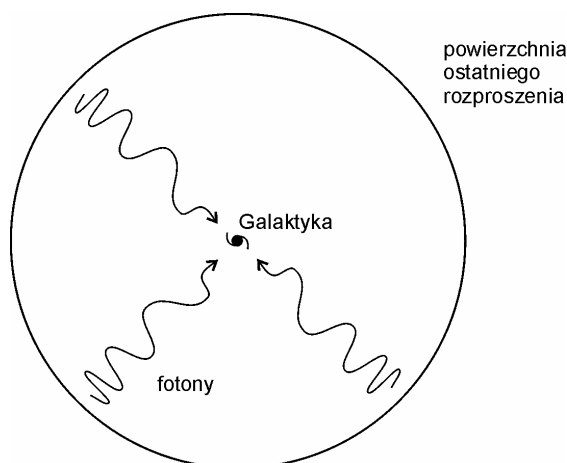
Dzisiaj wiemy, że prawda leży pośrodku. Analiza przebiegu pierwszych kilku minut *po Wielkim Wybuchu* pokazuje, że przez reakcje fuzji, czyli przez łączenie się neutronów i protonów *wyprodukowane zostały wtedy izotopy wodoru, helu i nieznaczne ilości lekkich pierwiastków*. Na tym się skończyło, bo temperatura i gęstość pierwotnego Wszechświata zmalała po tym czasie poniżej granicy dopuszczającej reakcje fuzji. *Reszta pierwiastków została wyprodukowana wewnątrz gwiazd*. W procesach przemiany wodoru w hel, a następnie w przemianie helu powstały cięższe pierwiastki, aż do żelaza włącznie. Takie reakcje jądrowe dostarczają energii, **dzięki czemu nasze Słońce i gwiazdy świecą**. Pierwiastki powyżej żelaza powstały w znacznej większości w eksplozjach supernowych, które są ostatnim etapem życia masywnych gwiazd. *W stosunku do masy całego Wszechświata, ilość pierwiastków produkowanych w gwiazdach stanowi drobny ułamek masy pierwotnego wodoru i helu, w zgodzie z mechanizmem Wielkiego Wybuchu*.

W 1964 roku **Arno Penzias** i **Robert Wilson** testowali prototypową antenę dla radiowej łączności satelitarnej i natrafili na dziwny „szum” w zakresie promieniowania mikrofalowego. Wytlumaczenie tego zjawiska podał ostatecznie astrofizyk **James Peebles**. Jego obliczenia pokazały, że Wszechświat wypełnia promieniowanie, które doskonale imituje znane z termodynamiki ciągłe widmo, jakie wysyła ciało doskonale czarne o temperaturze zaledwie ok. 2,7 kelwinów. Było to promieniowanie wysłane przez gorący gaz, wypełniający Wszechświat około 380 000 lat po Wielkim Wybuchu. Temperatura Wszechświata spadła wówczas do ok. 3000 kelwinów i pozwoliła elektronom połączyć się z jądrami atomowymi, czyli przejść od nieprzezroczystej, gorącej plazmy do gorącego gazu atomów, który był już przezroczysty dla fotonów promieniowania. Oczywiście, to pierwotne promieniowanie miało bardzo małą długość fali. Ale przestrzeń Wszechświata rozszerzała się, a wraz z nią wydłużały się fale fotonów

i ostatecznie dostaliśmy promieniowanie mikrofalowe, o długości fali odpowiadającej temperaturze tylko 2,7 kelwina. Nazywamy je *promieniowaniem resztkowym*. Na tym polega kosmiczny efekt Dopplera.

$$[\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{emisji}}]/\lambda_{\text{emisji}} = z, \quad R(t_0)/R_{\text{rek}} = T_{\text{rek}}/T_0 = 1 + z \approx 1000. \quad (6)$$

Tyle razy zmienił się kosmiczny czynnik skali i temperatura po rekombinacji.

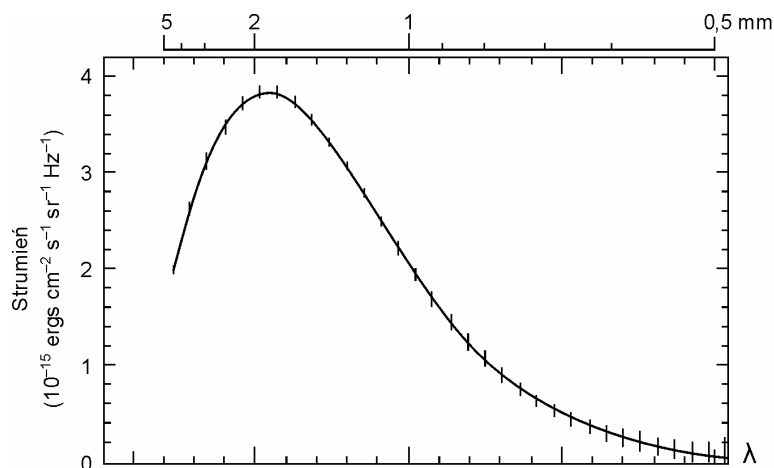


Rys. 3. Kosmiczny efekt Dopplera

Wykrycie promieniowania resztkowego i wytłumaczenie mechanizmu kosmicznej nukleogenezy ostatecznie wykluczyło hipotezę stacjonarnego Wszechświata.

Ale **ASTRONOMIA** szykowała **FIZYCE** nową niespodziankę.

Interpretację odkrycia Penziasa i Wilsona potwierdziły liczne, późniejsze obserwacje, wykonywane kolejno na pokładach samolotów i w gondolach stratosferycznych balonów, a w ostatnich latach za pomocą sond kosmicznych COBE i WMAP. *Ujawniły one niezwyklej jednorodność rozkładu temperatury promieniowania resztkowego na niebie.* Niezależnie od kierunku obserwacji, nie zmienia się ona więcej niż o jedną tysięczną procenta!!! Termodynamika uczy nas, że świadczy to o doskonałej termicznej równowadze Wszechświata, która panowała podczas wysyłania promieniowania resztkowego, czyli około 380 000 lat po Wielkim Wybuchu.

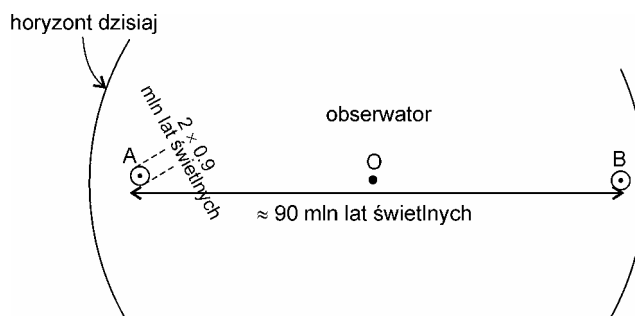


Rys. 4. Widmo promieniowania resztkowego

Dla uzyskania stanu równowagi termodynamicznej wszystkie obszary Wszechświata wysyłającego w naszym kierunku promieniowanie resztkowe musiały się ze sobą kontaktować! I tutaj pojawia się nowa trudność.

ASTRONOMIA: *A co z problemem horyzontu???*

Żaden sygnał nie może poruszać się szybciej od prędkości światła w próżni i to wyznacza rozmiary horyzontu, poza którym nie można się kontaktować, np. dla uzyskania równowagi termodynamicznej.

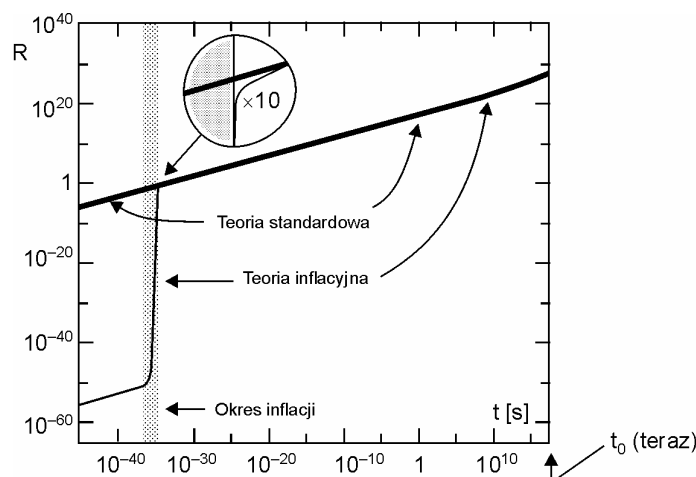


Rys. 5. Problem horyzontu

Według równań Friedmana-Lemaître'a nasz horyzont obejmuje dzisiaj znacznie większą część Wszechświata niż 380 tysięcy lat po Wielkim Wybuchu. Wtedy promień horyzontu, $r_{\text{hor}} \approx 0,9$ miliona lat świetlnych, a odległość źródeł emisji dwóch fotonów, które dzisiaj widzimy wynosiła aż: $AB \approx 90$ milionów lat świetlnych. Nie powinno więc dojść do stanu równowagi termodynamicznej.

FIZYKA: *Zgadamy się!!! Problem horyzontu grozi kryzysem hipotezie Wielkiego Wybuchu.*

Rozwiązanie, choć wysoce niestandardowe zaproponował ćwierć wieku temu **Alan H. Guth**. Jest nim scenariusz tzw. **inflacji**, czyli gwałtownego rozszerzenia („rozęcia”) Wszechświata tuż po Wielkim Wybuchu.



Rys. 6. Inflacja Wszechświata

W tym scenariuszu widziany dzisiaj Wszechświat był przed fazą inflacji niezwykle mały i cały zawarty wewnątrz horyzontu. Wszystkie obszary Wszechświata mogły więc kontaktować się ze sobą i dojść do stanu równowagi.

Ale jak spowodować inflację? Równania Friedmana-Lemaître'a dają formalną możliwość uzyskania niezbędnej do tego celu, różnej od zera dodatniej drugiej pochodnej kosmicznego czynnika skali.

Przekształcając wzory (4) i (5) otrzymujemy równanie:

$$\frac{d^2R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3c^2}(\rho c^2 + 3p)R, \quad (7)$$

które ze względu na znak minus i oczekiwaną dodatnią wartość występujących po prawej stronie wielkości, nazywane jest równaniem hamowania. Widzimy, że im wyższe ciśnienie, tym wolniej rozszerza się Wszechświat. Jest to zrozumiałe bo wymiar ciśnienia, [siła/cm²], jest identyczny z wymiarem gęstości energii [siła · cm/cm³], a energia to masa razy c². Ale $\rho_E = \rho_m c^2$. A więc ciśnienie działa efektywnie jak gęstość masy (energii). Jego wzrost wzmacnia pole grawitacyjne. Warto w tym miejscu zauważyć, że dla powietrza pod ciśnieniem atmosferycznym pole grawitacyjne generowane przez jego ciśnienie jest o 11 rzędów wielkości mniejsze od pola generowanego przez masę powietrza.

Zakładając natomiast odpowiednio dużą *ujemną wartość ciśnienia* p , dostaniemy *odpychanie grawitacyjne i inflację!!!* Problem w tym, że fizyczna ciecz, czyli pozostający w stanie równowagi układ, składający się z mikroskopowych cząstek, nie może mieć ujemnego ciśnienia. Wynika to z praw termodynamiki i zasady wzrostu entropii (np. L.M. Sokołowski [3]). Jeśli przyjmujemy jednak istnienie skalarnego pola energii próżni, która ma równanie stanu: $p = -\rho c^2$, to pojawi się inflacja. Można pokazać, że teraz przyspieszenie ekspansji Wszechświata będzie rosło eksponencjalnie.

Wprowadzając do równania (5) pole o równaniu stanu: $p = -\rho c^2$, które nazwiemy polem inflatonowym, dostajemy drugie równanie Friedmana-Lemaître'a, zredukowane do postaci:

$$c^2 \frac{d}{dt}(\rho R^3) = c^2 \rho \frac{d}{dt}(R^3). \quad (8)$$

Wynika stąd, że $\rho = \text{const}$. A więc *w procesie inflacji gęstość energii nie zmienia się, mimo że Wszechświat się rozszerza!!! Tego typu procesów dotychczas w fizyce nie było!!!*

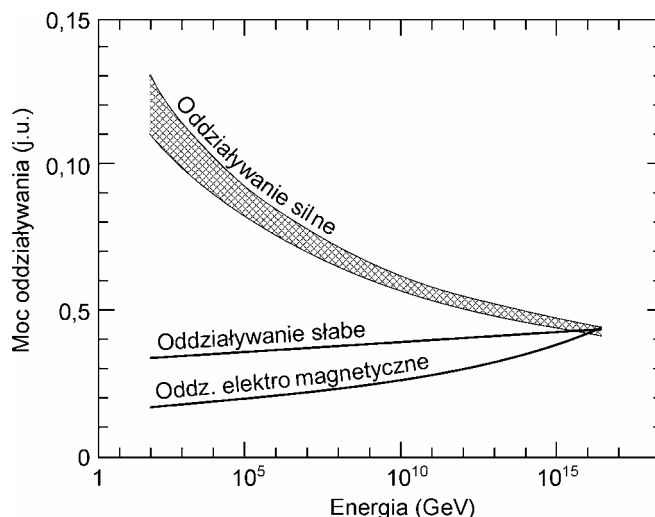
Oczywiście natychmiast pojawiają się przed **FIZYKĄ** problemy:

- 1) *skąd wziąć pole inflatonowe i rozpocząć inflację?*
- 2) *jak pozbyć się pola inflatonowego i zakończyć inflację?*

Dla ich rozwiązania *musimy wyjść poza ramy STANDARDOWEJ FIZYKI*. Kolejni autorzy – np. **A.H. Guth, A. Linde, A. Albrecht, P. Steinhardt** – proponują w tym celu różne scenariusze. Posługują się one pojęciem pola inflatonowego, przez analogię do **pól Higgsa**, stosowanych w fizyce cząstek elementarnych.

W dzisiejszym świecie cząstki elementarne komunikują się ze sobą, poza grawitacją, poprzez oddziaływania silne, słabe i elektromagnetyczne. „Silnie” oddziałują kwarki, a w konsekwencji bariony. Oddziaływanie „słabe” rządzi np. przemianami β . Oddziaływanie elektromagnetyczne występuje pomiędzy ładunkami elektrycznymi. Nośnikami tych oddziaływań są: dla „silnych” – gluony, dla „słabych” – bozony W^+ , W^- , Z^0 , dla elektromagnetycznych – fotony. Dla oddziaływań grawitacyjnych powinny to być „grawitony”, ale brak na razie kwantowej teorii grawitacji. Można zadać pytanie: czemu mamy 3 (z grawitacją 4) oddziaływania, różniące się „siłą”? Istnieją eksperymentalne przesłanki sugerujące, że różnica mocy oddziaływań silnych, słabych i elektromagnetycznych zmniejsza się gdy przechodzimy do coraz wyższych energii. Badania teoretyczne sugerują, że można oczekiwać unifikacji tych trzech oddziaływań (patrz rys. 7), ale dopiero dla bardzo wysokich energii – od około $2 \cdot 10^{16}$ GeV. Odpowiada to temperaturze równowagi termicznej około 10^{29} K. Jedynym „akceleratorem” pozwalającym osiągać takie energie jest Wielki Wybuch. Wielkiej unifikacji

z oddziaływaniem grawitacyjnym można oczekiwać dopiero przy tzw. **energii Plancka**, około 10^{19} GeV.



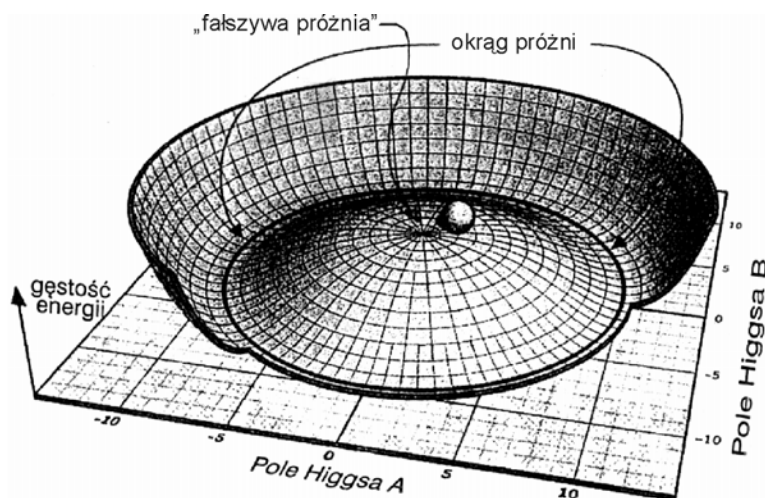
Rys. 7. Droga do unifikacji oddziaływań

Nasuwa się **pytanie**: *dlaczego ta pojedyncza, zunifikowana siła rozpada się, w miarę oziębiania się Wszechświata po Wielkim Wybuchu, na 3 (z grawitacją na 4) oddziaływania?*

Sugerowana odpowiedź: *Przy niższej temperaturze (energii) następuje spontaniczne złamanie symetrii w zespole pól Higgosa, które prowadzi do nadania masy znanym dzisiaj cząstkom elementarnym i nośnikom oddziaływań: silnego, elektromagnetycznego i słabego. Pola Higgosa wprowadzono pierwotnie w teorii oddziaływań elektro-słabych, a ich nazwa pochodzi od nazwiska **Petera W. Higgosa**.*

Na czym polega spontaniczne łamanie symetrii? Posłużmy się przykładem procesu krystalizacji, np. fluorokrzemianu glinu. W wysokiej temperaturze jest to ciekła substancja, jednorodna, w której brak wyróżnionego kierunku (jest zachowana symetria). W odpowiednio niskiej temperaturze następuje złamanie symetrii, przechodzi ona w przezroczysty, rombowy kryształ zwany topazem. Pojawiają się osie kryształu X,Y,Z, wzdłuż których światło rozchodzi się z różną prędkością. Orientacja osi kryształu w przestrzeni stanowi losowy efekt procesu krystalizacji, zwany spontanicznym łamaniem symetrii.

W najprostszej wersji zespół składa się z 24 pól Higgosa. Aby to możliwie prosto wytłumaczyć posłużmy się jeszcze prostszym przykładem, ograniczonym do dwóch pól Higgosa (patrz rys. 8).



Rys. 8. Gęstość energii pól Higgsa i łamanie symetrii w procesie inflacji

Widzimy tutaj gęstość energii pola Higgsa w funkcji natężenia składowych A i B. Obszar w pobliżu punktu $A=B=0$ nazywamy „falszywą próżnią”. Falszywą, bo gęstość energii jest tutaj różna od zera, mimo że wartości pól znikają. Dla zwykłego pola, np. elektromagnetycznego, gęstość energii jest zerem gdy pole znika. Losy Wszechświata są podobne do losów kulki, która stacza się z punktu „falszywej próżni” na okrag „prawdziwej próżni”, gdzie gęstość energii jest zerem. Tutaj energia zamienia się w „gorącą zupę” cząstek, które wypełniają nasz Wszechświat. Wartości pól Higgsa na okregu próżni (w zależności od kierunku staczania się, który jest przypadkowy) decydują o masach cząstek i typie oddziaływań (nośniki oddziaływań). To jest właśnie *spontaniczne łamanie symetrii*. Inflacja kończy się gdy układ znajdzie się na okregu próżni.

Jak pokazuje rys. 6, inflacja trwa niesłychanie krótko i niesłychanie „rozdyma” Wszechświat. Dokładne liczby są niepewne, bo zależą od ciągle niepewnych szczegółów teorii wielkiej unifikacji. Nie ulega jednak wątpliwości, że *inflacja musi „wypłaszczać” przestrzeń Wszechświata*, podobnie jak w przypadku powierzchni balonu, jeśli jego promień staje się gigantyczny.

Ale równania Friedman’a-Lemaître’a dopuszczają zbliżoną do płaskiej geometrię Wszechświata tylko wtedy gdy parametr $\Omega_0 \approx 1$, czyli dla przypadku, gdy średnia gęstość materii we Wszechświecie jest bliska gęstości krytycznej $\rho_{kr} \approx 2 \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$.

A więc nieuniknione pytanie **FIZYKI**: *jaka jest średnia gęstość materii Wszechświata?*

ASTRONOMIA: *niełatwo odpowiedzieć na to pytanie!*

Można zacząć od zliczania gwiazd w odpowiednio dużym obszarze. Teoria budowy gwiazd pozwala nieźle oszacować masę gwiazdy jeśli zmierzymy jej jasność i powierzchniową temperaturę. Odpowiedź nie jest zachęcająca. $\Omega_{\text{gwiazd}} = \rho_{\text{gwiazd}}/\rho_{\text{kr}} \leq 0,005$.

Oczywiście nie wszystkie gwiazdy świecą. Obiekty o masie mniejszej od ok. 0,08 masy Słońca, tzw. brązowe karły, należą do tej kategorii. Znaczną część materii występuje również w postaci gazu. Tak jest np. w gromadach galaktyk. Ten gaz jest bardzo gorący i „widać” go w widmie promieni X. To wszystko jednak nie wystarcza by otrzymać $\Omega_0 \approx 1$. Co więcej, *mechanizm pierwotnej nukleosyntezy, a ściśle biorąc pomiar względnego stosunku liczby wyprodukowanych izotopów deuteru, trytu, helu3, helu4 i litu7, pozwala oszacować gęstość materii barionowej we Wszechświecie. Tej materii z której praktycznie zbudowany jest cały dostępny nam świat materii ożywionej i nieożywionej. Wynosi ona zaledwie $0,03 < \Omega_B < 0,05!!!$*

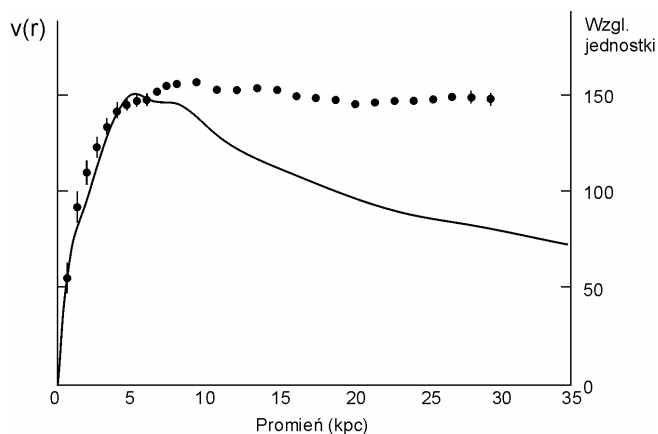
ASTRONOMIA: *tak, rozumiemy, że sytuacja jest poważna. Ale od kilkadziesiąt lat obserwujemy zjawiska sugerujące obecność tajemniczej materii, która oddziałuje grawitacyjnie, lecz jest niewidoczna. Natury tej materii nie umiemy wytłumaczyć.*

J.H. Oort i F. Zwicky już w latach 1932–1933 sugerowali, że dynamiki ruchu w naszej galaktyce i w gromadach galaktyk nie da się wytłumaczyć grawitacją znanych obiektów.

Problem tajemniczej, niewidzialnej, a więc oddziałującej wyłącznie grawitacyjnie, lub niemal wyłącznie grawitacyjnie materii, zwrócił uwagę astronomów, ponad 70 lat temu.

1) *Różnicowa rotacja galaktyk spiralnych*

Większa, niż sugerowana przez dynamikę widzianej materii, prędkość rotacji gwiazd i świecącego gazu, obserwowana w galaktykach spiralnych na większych odległościach od osi obrotu (rys. 9) sugeruje na ogół *istnienie „halo” dodatkowej, oddziałującej grawitacyjnie materii*, której nie można wykryć standardowymi metodami obserwacyjnej astronomii. Przyjęto nazywać ją „ciemną materią”.



Rys. 9. Prędkość różnicowej rotacji galaktyki spiralnej NGC 3198. Wyniki pomiarów (punkty) i przewidywania dynamiki Newtona (krzywa)

2) Gorący gaz w gromadach galaktyk

Grawitacja w gromadach galaktyk wytwarza dół potencjału, wypełniony gorącym gazem (głównie wodór i hel), który to gaz można obserwować w widmie promieniowania X. Masa tego gazu przewyższa masę gwiazd świecących w galaktykach. Aby wyjaśnić fakt uwięzienia tego gorącego gazu w gromadzie galaktyk, koniecznym jest przyjęcie obecności dodatkowej „ciemnej materii”, której grawitacja pogłębia dół przyciągającego potencjału.

FIZYKA: – „ciemna materia” to trudny problem. Pracujemy nad nim, ale jak na razie nie mamy w tej sprawie jednolitego zdania. Raczej różne propozycje.

Zwolennicy koncepcji istnienia „ciemnej materii” uważają, że:

Przyjęcie istnienia cząstek „ciemnej materii” pozwala zadawalająco wytłumaczyć problem anomalnej, różnicowej rotacji galaktyk spiralnych, problem obecności gorącego gazu w gromadach galaktyk, a także rozwiązać problem narodzin pierwszych gwiazd.

ASTRONOMIA sugeruje, że pierwsze gwiazdy powstały ok. 300 milionów lat po Wielkim Wybuchu. Niezwykła jednorodność rozkładu temperatury T , promieniowania resztkowego na niebie, $\Delta T/T \approx 10^{-5}$ mówi, że aż do ok. 380 000 lat po Wielkim Wybuchu fluktuacje gęstości gorącej plazmy były w znacznym stopniu wygładzane w wyniku zderzeń cząstek i ich wielkość nie wystarczały do zapoczątkowania procesu formowania się pierwszych gwiazd już około 300 milionów lat po Wielkim Wybuchu. Chodzi tutaj oczywiście o *materię barionową*, z której w przeważającej większości zbudowany jest otaczający nas świat. Ograniczenie wielkości fluktuacji gęstości nie dotyczy jednak „ciemnej materii”, która z wyjątkiem grawitacji oddziałuje słabo i już przed momentem rekombinacji materii barionowej mogła formować większe skupiska, które na-

stępnie po zniknięciu pierwotnej plazmy mogły – przyciągając materię bariową – przyspieszyć proces formowania pierwszych gwiazd.

Przeciwnicy koncepcji istnienia „ciemnej materii” twierdzą:

Nie wiemy czym mogłaby być „ciemna materia”. Ale może warto tak zmodyfikować prawa fizyki, by „ciemna materia” nie była potrzebna.

Można tak „ulepszyć” prawo grawitacji Newtona na dużych odległościach (tzw. *modified Newtonian dynamics*, MOND), by problem różnicowej rotacji galaktyk dał się wyjaśnić.

Zwolennicy koncepcji istnienia „ciemnej materii”:

Parametry potencjału grawitacyjnego w MONDzie potrzebne np. dla prawidłowego opisu różnicowej rotacji nie są uniwersalne, a problemu narodzin pierwszych gwiazd nie da się na tej drodze rozwiązać.

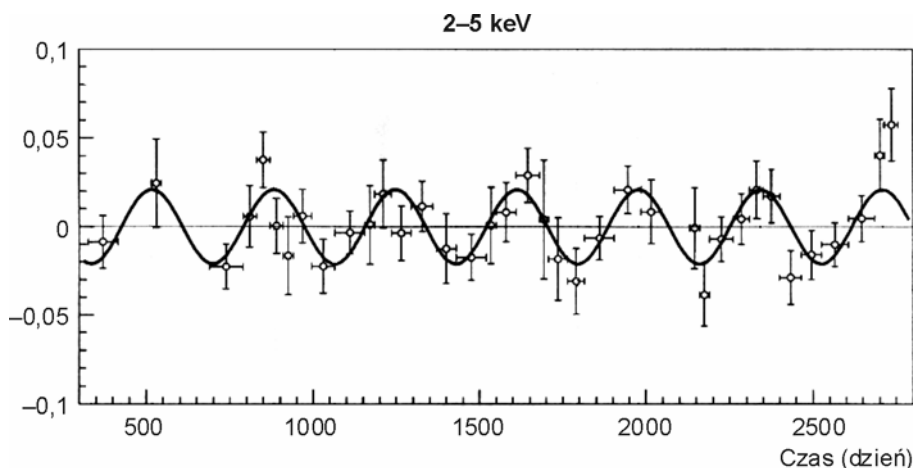
Przeciwnicy koncepcji istnienia „ciemnej materii”:

Brak obserwacyjnych (eksperymentalnych) dowodów istnienia „ciemnej materii”.

Zwolennicy koncepcji istnienia „ciemnej materii”:

Brak, jak na razie, eksperymentalnych dowodów na istnienie cząstek „ciemnej materii” nie jest argumentem. Fizyka zna przypadek cząstki, która oddziałuje grawitacyjnie, a niesłychanie słabo z materią. Jest nią neutrino, którego istnienia wymagał mechanizm rozpadu beta, a na którego eksperymentalne odkrycie musieliśmy czekać kilkadziesiąt lat.

W obecnej chwili pracuje na świecie kilka urządzeń, których celem jest wykrycie cząstek „ciemnej materii”. Przyjmuje się wprawdzie, że cząstki „ciemnej materii” oddziałują zasadniczo grawitacyjnie, może istnieć jednak pewne resztkowe oddziaływanie innego rodzaju, które umożliwia przekaz energii i pędu w wyniku kontaktu tych cząstek z atomami czy elektronami. Tak jest np. w oddziaływaniu neutrin z materią. Jednocześnie zakłada się, że nasza Galaktyka, Droga Mleczna, zanurzona jest w obłoku (halo) „ciemnej materii”, a planeta Ziemia w swym ruchu wokół Słońca porusza się przez pół roku z nieco większą, a przez pół roku z nieco mniejszą prędkością względem tego obłoku. Dzięki temu odpowiednio czuły detektor powinien w rytmie półrocznym zmieniać tempo swoich zliczeń. Wielkim problemem tego typu eksperymentów jest osłonięcie detektora od tła promieni kosmicznych i promieniotwórczości otoczenia, przy zachowaniu maksymalnej czułości (niskiego progu detekcji).



Rys. 10. Roczne cykle zmian zliczeń detektora DAMA

Rys. 10 pokazuje szybkość zliczeń detektora DAMA, który od siedmiu lat pracuje w tunelu pod przełęczą Gran Sasso w pobliżu Rzymu. Wprawdzie głębokość modulacji sygnału nie przekracza tutaj 5%, ale sugeruje dla okresu jej zmian wartość $(1,00 \pm 0,01)$ roku, jak można było oczekiwać.

ASTRONOMIA: *czym mogłyby być cząstki „ciemnej materii”?*

FIZYKA: *rozważane są różne możliwości*

Niestety nie wydaje się aby mogły to być *neutrino*, bo z uwagi na niemal zerową masę poruszają się praktycznie z prędkością światła i trudno by je było uwięzić w poszukiwanych obłokach „ciemnej materii”, czy w pierwotnych fluktuacji gęstości.

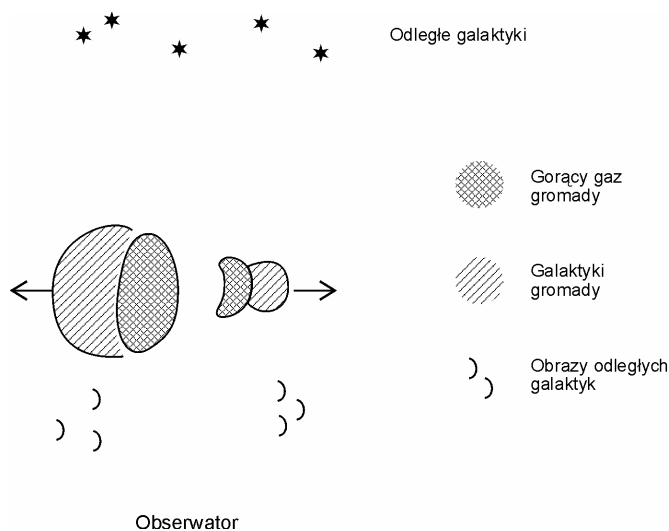
Lepszym kandydatem byłyby tutaj WIMPS-y (*weakly interacting massive particles*), które pojawiły się tuż po Wielkim Wybuchu. Fizyka cząstek elementarnych poszukuje mechanizmu, który mógłby być odpowiedzialny za ich narodziny.

Innymi kandydatami mogłyby być np. aksjony, cząstki supersymetryczne, czy też tzw. sterylne neutrino, których istnienie sugerują niestandardowe modele cząstek elementarnych. Dla ich znalezienia pracują: Axion Dark Matter Experiment (ADMX), Cryogenic Dark Matter Search (CDMS), EDELWEISS, ZEPLIN, czy Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers (CRESST).

Wszystkie te eksperymenty nastawione są na wykrycie cząstek przewidywanych przez jakiś konkretny model cząstek elementarnych, który narzuca ich własności, np. masę. Jak na razie wyniki poszukiwań dają rezultat zerowy. Wyjątkiem jest eksperyment DAMA, który nie bazuje na żadnym modelu i który sugeruje istnienie jakichś cząstek o masie < 10 GeV.

ASTRONOMIA: wiadomość z ostatniej chwili!

A może to my dostarczymy pierwszego obserwacyjnego argumentu na istnienie obłoku „ciemnej materii”!!!



Rys.11. Zderzenie gromad galaktyk

Zderzenie gromad galaktyk: Pod koniec sierpnia 2006 ogłoszono wyniki obserwacji wielkiej gromady galaktyk 1E0656-558, oddalonej od nas o 3,5 miliarda lat świetlnych w kierunku gwiazdozbioru Kilu. Obserwowano ją zarówno w świetle widzialnym (zespół **Douglasa Clowe**) jak i w paśmie rentgenowskim (zespół **Maxima Markevitcha**). Okazuje się, że gromada 1E0656-558 jest w rzeczywistości wynikiem zderzenia z prędkością 4700 km/s dwóch gromad galaktyk, które zaszło ok. 100 mln lat temu i które obserwujemy w kierunku prostopadłym do linii zderzenia. Widoczne w świetle widzialnym galaktyki obu gromad minęły się swobodnie, bo indywidualne zderzenia gwiazd są mało prawdopodobne. Inaczej wygląda sprawa z wypełniającym gromady gazem, który jest tutaj wyjątkowo gorący (ponad 200 mln kelwinów) i bardzo wyraźnie świeci w paśmie rentgenowskim. Na obrazie wyraźnie widać falę uderzeniową, która spowalnia gaz i silnie go rozgrzewa. Tak więc galaktyki obu gromad i wypełniające go obłoki gazu przesunęły się względem siebie. Galaktyki są bardziej na zewnątrz, obłoki gazu pomiędzy nimi. I tutaj nadchodzi sensacyjna część obserwacji! Posługując się kosmicznym teleskopem Hubble'a i czterema osmiometrowymi teleskopami Europejskiego obserwatorium w Chile, zauważono na tle galaktyk gromady 1E0656-558 charakterystyczne łuki, będące zniekształconymi obrazami galaktyk leżących w stosunku do obserwatora daleko poza gromadą 1E0656-558 i będące wynikiem ogniskowania grawitacyjnego.

Gromada 1E0656-558 odgrywa tutaj rolę *soczewki grawitacyjnej*. Łuków tych nie widać na tle obłoków gorącego gazu, mimo że tam, jak wiemy, powinna być skupiona większość materii gromady. A więc obłoki „ciemnej materii”, które głównie odpowiadają za efekty grawitacyjne w gromadzie galaktyk, podobnie jak galaktyki obu gromad minęły się swobodnie, zostawiając za sobą obłoki gorącego gazu reprezentujące większość materii barionowej gromad. Tę obserwację można uważać za pierwszy obserwacyjny dowód istnienia „ciemnej materii”. Oczywiście, oczekuje się teraz kolejnych obserwacji astronomicznych, prowadzących do podobnych wniosków.

ASTRONOMIA do FIZYKI: *Eksperymentalne potwierdzenie istnienia „ciemnej materii” nie rozwiąże niestety waszych trudności z wytłumaczeniem praktycznie płaskiej geometrii Wszechświata. Różnego typu oszacowania wskazują, że dla materii M, zarówno barionowej B, jak i „ciemnej” C, mamy tylko:*

$$\Omega_M = \Omega_C + \Omega_B \approx 0,3$$

Na domiar złego, obserwacja eksplozji supernowych typu Ia, służących jako standardowe świece, pokazuje ostatnio, że wbrew siłom grawitacji ekspansja Wszechświata zaczęła przyspieszać około 5 miliardów lat temu!!! Co wy na to?

FIZYKA: *A może Albert Einstein miał rację i należy zrobić użytek z proponowanej przez niego stałej kosmologicznej Λ ?*

Jeśli przyjąć $k > 0$ i odpowiednio dobraną wartość Λ otrzymamy kosmiczny czynnik skali $R(t) = \text{const}$, a więc statyczny Wszechświat, tak jak chciał wówczas Einstein.

Ale jeśli położymy $\Lambda \neq 0$ to w równaniach Friedmann’a-Lemaître’a pojawi się nowy człon.

Np. równanie dla kosmicznego czynnika skali przybierze postać:

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + kc^2 = \left(\frac{8}{3}\pi G\rho + \frac{1}{3}\Lambda c^2\right)R^2, \quad (9)$$

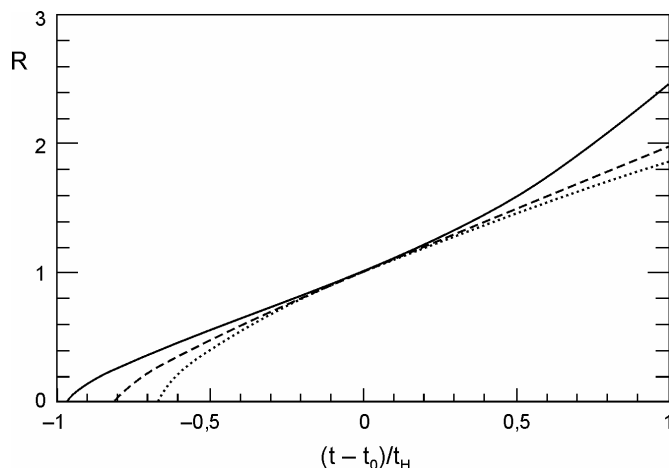
a równanie deceleracji:

$$\frac{1}{R} \frac{d^2R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3c}(\rho c^2 + 3p) + \frac{1}{3}\Lambda c^2 \quad (10)$$

Teraz o geometrii (krzywiznie) Wszechświata będzie decydować:

$$\Omega_R \equiv 1 - (\Omega_0 + \Omega_\Lambda), \text{ gdzie } \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H_0^2}.$$

Mamy teraz: Wszechświat otwarty dla $\Omega_R > 0$, płaski dla $\Omega_R = 0$ i zamknięty dla $\Omega_R < 0$.



Rys. 12. Różne drogi ewolucji Wszechświata i ich zależność od stałej kosmologicznej i gęstości materii. $\Omega_0 = 1, \Omega_\Lambda = 0$ – kropki; $\Omega_0 = 0,3, \Omega_\Lambda = 0$ – linia przerywana; $\Omega_0 = 0,3, \Omega_\Lambda = 0,7$ – linia ciągła

Rysunek 12 pokazuje jak to wpłynie na zmianę w czasie czynnika kosmicznej skali. Czas podany jest tutaj we względnych jednostkach, gdzie $t_H = (H_0)^{-1}$ jest tzw. czasem Hubble'a. Widzimy, że $\Omega_0 = 1, \Omega_\Lambda = 0$ daje płaską, euklidesową geometrię Wszechświata, $\Omega_0 = 0,3, \Omega_\Lambda = 0$ daje Wszechświat o krzywiznie ujemnej, natomiast $\Omega_0 = 0,3, \Omega_\Lambda = 0,7$ kreuje Wszechświat z geometrią euklidesową i wartością Ω_0 zgodną z obserwacjami.

Stałej kosmologicznej Λ można przypisać sens fizyczny związany ze stałą energią próżni, która generuje odpychanie na zasadzie ujemnego ciśnienia (równania 9 i 10). Zaczyna dominować gdy w rozszerzającym się Wszechświecie grawitacja odpowiednio osłabnie. W statycznym Wszechświecie gęstość energii, związanej z Λ jest 2 razy mniejsza niż gęstość materii. Aby wytłumaczyć tempo przyspieszenia ekspansji Wszechświata gęstość ta musiałaby być około 2 razy większa od gęstości materii. Nie znamy, jak na razie, źródła takiej ciemnej energii.

Tak jak to bywało dawniej, powyższe rozwiązanie ma swoich zwolenników i przeciwników. Są też inne propozycje:

Kwintesencja → pojawienie się pola, podobnego do pola inflatonowego, które zwiastuje nową epokę (stosunkowo łagodnej) inflacji.

Modyfikacje ogólnej teorii względności → teoria strun → dodatkowe wymiary które powodują osłabienie oddziaływania grawitacyjnego na dużych odległościach i zamianę w odpychanie???

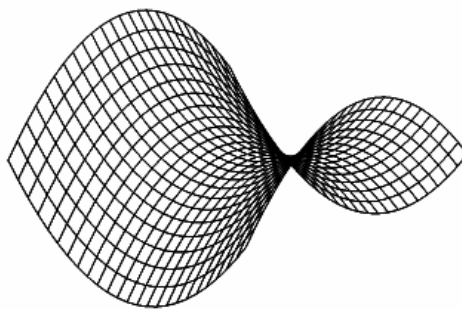
Na tym kończymy omawianie dyskusji, która od stuleci toczy się pomiędzy środowiskami astronomów i fizyków. Jak widać, jej rezultaty były i są jak naj-

bardziej pozytywne, otwierając nowe kierunki poznawania Wszechświata i rządzących nim praw. Ten proces nie jest bynajmniej zakończony. **Oto lista niektórych, stawianych przez astronomię pytań, które czekają na odpowiedź:**

1. Dlaczego nastąpił Wielki Wybuch?
2. Problem początkowej osobliwości, sugerowanej przez ogólną teorię względności?
3. Jaki jest naprawdę scenariusz i mechanizm inflacji?
4. Czym jest „ciemna materia”?
5. Czym jest „ciemna energia”?
6. Dlaczego około 5 mld lat temu Wszechświat zaczął przyspieszać ekspansję?
7. Jaki będzie przyszły scenariusz ewolucji Wszechświata?
.....?

Polecana literatura

- [1] A.H. Guth, *Wszechświat Inflacyjny*, Prószyński i S-ka 2000.
- [2] A. Liddle, *An Introduction to Modern Cosmology, Second Edition*, Wiley 2003 (jest polskie tłumaczenie pierwszego wydania).
- [3] L.M. Sokołowski, *Elementy Kosmologii*, ZamKor 2005.
- [4] M. Wójcik, *Poszukiwanie Cząstek Ciemnej, Zimnej Materii*, Polska Akademia Umiejętności, Prace Komisji Astrofizyki, Nr 11, 2007.



Powierzchnia siodłowa