

Satelity naszej Galaktyki

Janusz KAŁUŻNY

W literaturze popularnonaukowej często czytamy, że Słońce jest przeciętną, typową gwiazdą. Jest to w rzeczywistości daleko idące uproszczenie. Zdecydowana większość gwiazd w naszej Galaktyce to obiekty o masach mniejszych niż 0,3 masy Słońca i o mocy promieniowania o ponad 3 rzędy wielkości mniejszej niż słoneczna. W szczególności najbliższa znana gwiazda, Proxima Centauri, jest niepozornym obiektem wysyłającym w dziedzinie wizualnej widma około 10 000 razy mniej energii niż Słońce, a najbliższe znane gwiazdy wysyłają jeszcze kilkadziesiąt razy mniej promieniowania niż Proxima. Na całym niebie mamy około miliona gwiazd o obserwowanej jasności wizualnej większej niż jasność Proximy (przeciętny obserwator może dostrzec około 6000 gwiazd na całej sferze niebieskiej), a spośród 50 najbliższych znanych gwiazd tylko 8 jest widocznych gołym okiem. Jest pewne, że aktualna lista najbliższych gwiazd jest niekompletna. Obiekty bliskie, ale o bardzo niskiej jasności giną w tle milionów bardziej odległych, ale jaśniejszych.

Galaktyki także wykazują duży rozrzut parametrów, takich jak masa, moc promieniowania, rozmiary, co wynika przede wszystkim z faktu, że różnią się znacznie liczbą posiadanych gwiazd. Poniżej postaramy się wykazać, że nie dysponujemy obecnie kompletną listą również galaktyk z naszego najbliższego sąsiedztwa. Nasza Galaktyka należy do układu galaktyk zwanego Grupą Lokalną. Jest to układ związany grawitacyjnie. W jego skład wchodzi trzy stosunkowo masywne i duże galaktyki spiralne (nasza, M31 w Andromedzie i M33 w Trójgacie) oraz co najmniej 23 mniejsze obiekty. Tabela na str. 3 zawiera listę znanych członków Grupy Lokalnej. Ostatnia kolumna tej tabelki podaje całkowitą moc emitowaną w postaci promieniowania widzialnego wyrażoną w jednostkach mocy naszej Galaktyki. Jak widać, w Grupie Lokalnej przeważają galaktyki o ponad dwa rzędy wielkości słabsze niż nasza. Najśłabsze z nich należą do klasy tzw. galaktyk karłowatych sferoidalnych (po angielsku *dwarf Spheroidals*, w skrócie dSph).

Układy jednostek

Jan KALINOWSKI

Od kiedy zapanował w fizyce i technice niepodzielnie układ jednostek SI (skrót od francuskiego terminu *Système International d'Unités*), życie (szczególnie w szkole) stało się znacznie prostsze. Kto teraz z młodzieży wie, co to jest erg, jeśl, kaloria, albo że pojemność elektryczną mierzy się w cm? Kiedyś przeliczanie jednostek było postrachem wszystkich klasówek z fizyki. Obliczenia numeryczne bez przeliczenia jednostek nie miały najmniejszego sensu, bo nie wiadomo było, w jakich jednostkach wychodził wynik. W układzie SI każda wielkość fizyczna jest mierzona w raz na zawsze ustalonych jednostkach i w rachunkach można o nich właściwie „zapomnieć”.

Przejęcie do układu SI zostało zarekomendowane na XI Generalnej Konferencji Miar i Wag w 1960 roku. Podstawowymi jednostkami mechanicznymi tego układu są: metr, m; kilogram, kg; sekunda, s. (Były one też bazą układu MKS, prekursora SI.) Wszystkie pozostałe wielkości mechaniczne mają jednostki pochodne – wyrażane jako pewna kombinacja podstawowych. Na przykład: siła, newton, $N = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; praca, dżul, $J = N \cdot \text{m}$; ciśnienie, paskal, $\text{Pa} = N \cdot \text{m}^{-2}$ itp. Pozostałe jednostki podstawowe SI to: amper, A; kelwin, K; mol; kandela, cd; ponadto uzupełniające: radian i steradian. Jednostkami pochodnymi są: kulomb, wolt, om, weber, tesla itd. Oprócz tych jednostek układ SI dopuszcza używanie jednostek będących ich dziesiątą częścią lub krotnością przez dodanie odpowiedniego przedrostka:

10^{-1}	decy	d	10	deka	da
10^{-2}	centy	c	10^2	hekto	h
10^{-3}	mili	m	10^3	kilo	k
10^{-6}	mikro	μ	10^6	mega	M
10^{-9}	nano	n	10^9	giga	G
10^{-12}	piko	p	10^{12}	tera	T
10^{-15}	femto	f	10^{15}	peta	P
10^{-18}	atto	a	10^{18}	eksa	E

Jedynym wyjątkiem od tej reguły jest kg, który jest jednostką podstawową, zamiast grama. Jest to również pozostałość historyczna. (Zabawne(?) jest, że coraz częściej używa się przedrostków k, M, G i T w połączeniu ze złotówką, na przykład reklama Lotto mówi: Gzł w środę, Gzł w sobotę.)

W Polsce układ SI obowiązuje od 1966 roku. Pomimo tego stopnie Celsjusza są ciągle w użyciu, chociaż może niektórzy pamiętają gorliwców podających prognozy pogody w telewizji w kelwinach. Niestety, atmosfery, milibary i milimetry rtęci zginęły ze słownika. Zastąpiły je hektopaskale. Przyzwyczailiśmy się w końcu do dziwołagów typu *ciśnienie wynoszące 1000 hektopaskali*. A przecież nikt nie powie, że z Warszawy do Koluszek jest w przybliżeniu 1000 hektometrów, tylko 100 kilometrów. Hektopaskale to spuścizna po wprowadzaniu na siłę jednostek SI. Spróbujcie zresztą poprosić w warsztacie o wyregulowanie ciśnienia w oponach podając żądane ciśnienie w hektopaskalach. Przegonią!

Główną zaletą układu SI jest jego wygoda w użyciu w wielu zastosowaniach w nauce i technice. Wielorodność tradycyjnie i historycznie tworzonych jednostek dla tej samej wielkości fizycznej została zastąpiona przez jedną jednostkę z jasnymi regułami

tworzenia jej części lub wielokrotności. Ale nie ma róży bez kolców. Układ SI ma również swoje wady i używanie go w każdej sytuacji może być czasami bardziej niewygodne od użycia innego układu.

Podstawową wadą układu SI jest to, że w wielu prawach fizycznych pojawiają się wtedy dziwne współczynniki wymiarowe, których pochodzenie jest bardziej historyczne niż fizyczne i które utrudniają zrozumienie istoty zjawisk. Na przykład przenikalność dielektryczna ϵ_0 i magnetyczna μ_0 próżni są wymiarowe (i wynoszą $\epsilon_0 = (10^{11}/4\pi\bar{c}^2)$ (F/m), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/m), gdzie \bar{c} jest wartością prędkości światła w próżni wyrażoną w cm/s, a jednostka pojemności elektrycznej F (farad) ma wymiar $s^4 A^2 m^{-2} kg^{-1}$, H (henr) zaś $kg m^2 s^{-2} A^{-2}$). Stąd też natężenia pól elektrycznego E i magnetycznego H (również indukcji elektrycznej D i magnetycznej B) mają różne wymiary. Jest to spuścizna przedrelatywistycznego sformułowania elektrodynamiki, która jest sprzeczna z duchem równań Maxwella, w których pola E i H są składowymi tego samego tensora pola elektromagnetycznego.

Inną wadą układu SI jest, paradoksalnie, jego powszechność użycia. Przyzwyczajeni do układu SI zapominamy o swobodzie, jaką mamy w wyborze jednostek, a umiejętność dobrania odpowiednich jednostek do danego problemu jest jednym z istotnych narzędzi badawczych. Skrajnym tego przykładem jest fizyka mikroświata. Mamy tutaj do czynienia z cząstkami, których ładunki są rzędu ładunku elektronu, a nie kulomba, który zawiera ponad $6 \cdot 10^{18}$ elektronów. Cząstki te poruszają się zwykle z prędkościami rzędu prędkości światła $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, a naturalną jednostką momentu pędu i działania jest porcja równa stałej Plancka $\hbar = 10^{-34}$ J·s. Dlatego też bardziej „naturalnym” układem jednostek jest układ, w którym \hbar i c są jednostkami podstawowymi, a nie m, kg i s. Stąd już tylko krok do przyjęcia, że $\hbar = c = 1$. Jest to tak zwany naturalny układ jednostek. W tym układzie czas i długość mają ten sam wymiar, energia i pęd mają wymiar będący odwrotnością położenia, prędkość, działanie i moment pędu są bezwymiarowe. Jednostką energii jest wtedy elektronowolt, eV, gdzie $1 \text{ J} = 6,24 \cdot 10^{18} \text{ eV}$, lub $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$. O tym, że ten układ jest bardziej „naturalny” niż SI, może przekonać nas porównanie stałej grawitacji G_N określającej siłę oddziaływań grawitacyjnych ze stałą Fermiego G_F odpowiedzialną za oddziaływania słabe. W układzie SI stałe te wynoszą odpowiednio

$$G_N = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2},$$

$$G_F = 1,4 \cdot 10^{-62} \text{ J} \cdot \text{m}^3.$$

Spojrzenie na te liczby mogłoby sugerować, że oddziaływania grawitacyjne są o wiele silniejsze niż słabe. Jeśli przepiszemy je w jednostkach naturalnych, wtedy dostaniemy, że

$$G_N = 6,7 \cdot 10^{-39} \hbar c^5 \text{ GeV}^{-2},$$

$$G_F = 1,2 \cdot 10^{-5} \hbar c^3 \text{ GeV}^{-2}.$$

W układzie $\hbar = c = 1$ obie stałe mają ten sam wymiar i dopiero teraz można je porównać! Widzimy, że stała Fermiego jest 33 rzędu wielkości większa od stałej grawitacji, co jest w doskonałej zgodności z doświadczeniem, że w warunkach laboratoryjnych oddziaływania grawitacyjne można kompletnie pominąć w porównaniu ze słabymi. Z drugiej strony, stosowanie jednostek naturalnych w codziennym życiu lub w astronomii też byłoby bez sensu.

Jak widać, przymusowa standaryzacja jednostek może być czasem szkodliwa. Jak we wszystkim, tak i tutaj należy zachować umiar. Warto o tym pamiętać ucząc (się) fizyki.

Znani członkowie Lokalnej Grupy Galaktyk

Odległość D podana jest w kiloparsekach. L_V jest mocą promieniowania. LMC i SMC to odpowiednio Wielki i Mały Obłok Magellana. Ostatnie 6 obiektów jest prawdopodobnie satelitami M31.

Nazwa	D	L_V
Galaktyka	—	1
LMC	55	0.048
SMC	66	0.016
Ursa Minor	70	0.00002
Sculptor	83	0.0002
Draco	100	0.00004
Carina	170	0.00004
Fornax	250	0.001
Leo II	230	0.00004
Leo I	280	0.00006
Sextans	80	?
NGC 6822	460	0.003
NGC 147	570	0.002
NGC 185	570	0.003
M33	900	0.14
M31	830	1.20
NGC 205	830	0.016
M32	830	0.016
IC 1613	830	0.003
Andromeda I	830	0.0001
Andromeda II	830	0.0001
Andromeda III	830	0.0001

Pierwsze dwa obiekty tego typu zostały odkryte w roku 1938 przez Harolda Shapleya jako skupiska bardzo słabych gwiazd widoczne na zdjęciach fragmentów nieba w gwiazdozbiorach Pieca i Rzeźbiarza. Po łacinie gwiazdozbiory te nazywają się Fornax i Sculptor i taką też nazwę nadano nowo odkrytym galaktykom. Następne cztery galaktyki dSph znaleziono w roku 1955 podczas przeglądania klisz świeżo wykonanego atlasu fotograficznego północnej półkuli nieba. Obiekty te otrzymały nazwy Leo I, Leo II, Draco i Ursa Minor (od nazw gwiazdozbiorów Lwa, Smoka i Małej Niedźwiedzicy). Tak jak i dwie wcześniej odkryte galaktyki karłowate są one satelitami naszej Galaktyki.

Na dalsze odkrycia trzeba było czekać do roku 1972, kiedy to udało się odkryć trzy galaktyki typu dSph będące satelitami M31. Otrzymały one nazwy Andromeda I, Andromeda II i Andromeda III. Przy okazji kompletowania atlasu fotograficznego dla południowej półkuli nieba znaleziono w 1977 roku kolejną galaktykę dSph, nazwaną Carina od gwiazdozbioru Kil. W latach 80. powstały różnorakie katalogi zawierające dane dla milionów galaktyk położonych w odległości nawet wielu miliardów lat świetlnych. W tej sytuacji dużym zaskoczeniem było odkrycie kolejnej galaktyki położonej „tuż za miedzą”. Co ciekawsze, ten kolejny satelita naszej Galaktyki odkryty został przypadkowo i bez bezpośredniego udziału człowieka. W roku 1990 grupa astronomów z Cambridge (Anglia) analizowała zdjęcia

Przybliżone sumowanie

Witold BEDNAREK

Zacniemy od zadania: Wyznacz wartości sum

$$(1) \quad \frac{1}{\sqrt{1}} + \frac{1}{\sqrt{2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{9999}},$$

$$(2) \quad \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{9999}$$

z możliwie jak najlepszym przybliżeniem.

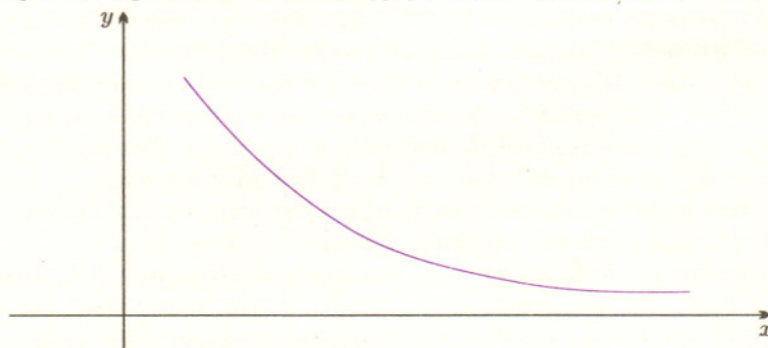
Na pierwszy rzut oka rozwiązanie wydaje się żmudnym procesem rachunkowym, bowiem w tych przypadkach nie istnieją powszechnie znane wzory sumacyjne (jak na przykład dla ciągu arytmetycznego i geometrycznego).

Spróbujmy inaczej podejść do problemu.

Rozważmy funkcję f określoną na zbiorze liczb dodatnich, która jest

1. dodatnia,
2. malejąca,
3. wypukła w dół,
4. różniczkowalna.

Rysunek 1 przedstawia orientacyjny kształt wykresu takiej funkcji.



Niech $A_k = (k, 0)$, natomiast $B_k = (k, f(k))$ dla $k \in \mathbb{N}$.

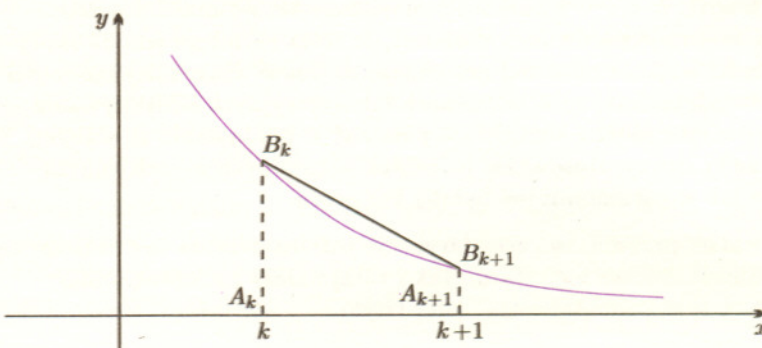
Niech P_k oznacza pole trapezu $A_k A_{k+1} B_{k+1} B_k$, a T_k – pole trapezu krzywoliniowego o tych samych wierzchołkach, to jest figury ograniczonej prostymi $y = 0$, $x = k$, $x = k + 1$ i wykresem funkcji f .

Mamy

$$(3) \quad P_k = \frac{f(k) + f(k+1)}{2}.$$

Ponieważ funkcja f jest wypukła w dół, więc odcinek $B_k B_{k+1}$ leży powyżej wykresu f w przedziale $(k; k+1)$. Zatem (rys. 2)

$$(4) \quad T_k < P_k.$$



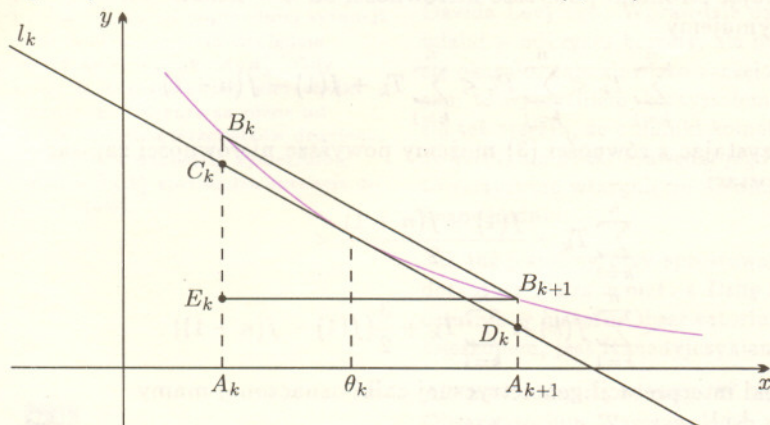
fragmentów nieba południowego. Celem programu było badanie wielkoskalowej struktury Wszechświata na podstawie analizy korelacji położenia odległych galaktyk. Takie odległe galaktyki mają rozmiary kątowe rzędu kilku sekund łuku i ich obrazy trudno jest odróżnić od obrazów słabych gwiazd, przez co wyznaczanie położenia i klasyfikacja setek tysięcy obiektów jest zajęciem niezwykle nudnym i czasochłonnym. Dlatego do tej pracy zaprzęgnięto komputer. Na jednym ze zdjęć fragmentu nieba w gwiazdozbiore Sekstansa „zauważył” on obszar o średnicy kilkunastu minut łuku, w którym gęstość słabych gwiazd była wyraźnie wyższa niż w obszarach sąsiednich. Wyszło wniosek, że te „dodatkowe” słabe gwiazdy są w rzeczywistości najjaśniejszymi gwiazdami pobliskiej, dotychczas nie znanej galaktyki karłowatej. Szybko wykonano dodatkowe obserwacje i już po roku było wiadomo, że nowo odkryty obiekt jest kolejnym słabym towarzyszem naszej Galaktyki. W 1992 roku doniesiono o znalezieniu jeszcze jednego takiego obiektu w gwiazdozbiore Tukana.

W najbliższych latach planowane jest wykonanie nowego atlasu całego nieba. Atlas ten będzie wykonany nie na kliszach fotograficznych, jak to było dotychczas, ale za pomocą detektorów CCD. Obrazy nieba będą zapisywane i przechowywane w postaci cyfrowej. Dzięki temu będzie możliwa ich bardzo dokładna i szybka analiza za pomocą komputerów. Nowy atlas pozwoli też na identyfikację gwiazd znacznie słabszych, niż było to możliwe w przypadku atlasów zrobionych techniką fotograficzną. Głównym celem autorów planowanego przeglądu jest klasyfikacja i badanie rozkładu przestrzennego kilkudziesięciu milionów galaktyk. Można jednak oczekiwać, że przy okazji odkryte zostaną dalsze galaktyki wchodzące w skład Grupy Lokalnej.

Pomimo podobnego wyglądu karłowate galaktyki będące satelitami Drogi Mlecznej nie stanowią jednorodnej grupy. Niektóre z nich zawierają wyłącznie bardzo stare gwiazdy o wieku zbliżonym do wieku najstarszych gwiazd w Galaktyce. Wszystkie gwiazdy, obserwowane w obiektach takich jak Scultor czy Ursa Minor, powstały mniej więcej jednocześnie w momencie tworzenia się tych galaktyk przed około 15 miliardami lat. Z kolei w obiektach takich jak Carina czy Leo I mamy mieszaninę gwiazd bardzo starych i stosunkowo młodych, utworzonych 5–7 miliardów lat temu. Obserwujemy w nich nawet gwiazdy o wieku nie przekraczającym 3 miliardów lat. Najwyraźniej ewolucja galaktyk karłowatych przebiegała na wiele sposobów.

Z twierdzenia Lagrange'a wynika, że przez pewien punkt o odciętej $\theta_k \in (k; k+1)$ można poprowadzić styczną l_k do wykresu f równoległą do prostej $B_k B_{k+1}$.

Niech C_k i D_k będą punktami przecięcia stycznej l_k odpowiednio z prostymi o równaniach $x = k$ oraz $x = k+1$ (rys. 3).



Z wypukłości w dół funkcji f wynika, że punkty C_k i D_k leżą odpowiednio poniżej punktów B_k i B_{k+1} . Niech wreszcie $E_k = (k, f(k+1))$. Łatwo zauważyć (jak?), że prosta l_k przecina odcinek $\overline{E_k B_k}$, a zatem

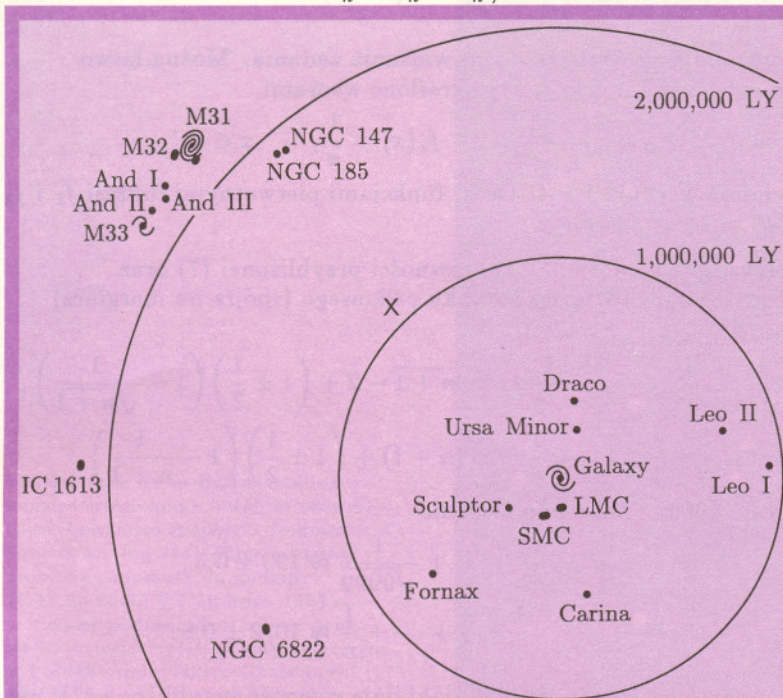
$$|B_k C_k| < |B_k E_k| = f(k) - f(k+1).$$

Czworokąt $C_k D_k B_{k+1} B_k$ jest równoległobokiem. Jeśli odcinek $B_k C_k$ przyjmiemy za podstawę, to wysokość będzie równa 1. Z ostatniej równości wynika, że pole R_k tego równoległoboku szacuje się następująco:

$$(5) \quad R_k = |B_k C_k| \cdot 1 < f(k) - f(k+1).$$

Prosta l_k dzieli trapez $A_k A_{k+1} B_{k+1} B_k$ na dwie figury. Jedną z nich jest równoległobok. Pole $P_k - R_k$ pozostałej części jest mniejsze od pola T_k trapezu krzywoliniowego $A_k A_{k+1} B_{k+1} B_k$:

$$P_k - R_k < T_k,$$



Grupa Lokalna Galaktyk w rzucie na płaszczyznę trzech najbardziej masywnych. X oznacza przybliżone położenie środka masy układu.

Niejednokrotnie w *Delcie* było wspomniane, że wielkość całkowitej masy Galaktyki jest przedmiotem kontrowersji. Z jednej strony sumaryczna masa gwiazd oraz obłoków gazu i pyłu wynosi około 10^{10} mas Słońca. Z kolei analiza orbit gwiazd oraz obłoków gazu wskazuje na wartość o rząd wielkości większą. W takiej sytuacji około 90% masy Galaktyki ukryte byłoby w obiektach niedostępnych obserwacji. Sugerowano, że ukryta masa występuje w postaci nieznanych cząstek elementarnych (np. masywne neutrino) lub gwiazdopodobnych obiektów o masach zbyt małych, aby mogły zainicjować reakcje termojądrowe w swoim wnętrzu (takie hipotetyczne obiekty o masach rzędu kilku mas Jowisza nazywane są brązowymi karłami). Masy galaktyk karłowatych są znacząco mniejsze niż masa Drogi Mlecznej i dlatego możemy traktować je jako cząstki próbne orbitujące w jej polu grawitacyjnym. Dzięki temu może stać się wykonalne nowe wyznaczenie masy naszej Galaktyki.

Załóżmy na początek, że dany satelita ma tylko radialną składową prędkości (v) względem centrum Galaktyki, którą potrafimy wyznaczyć dzięki efektowi Dopplera. Oczywiście, prędkość radialną wyznaczamy nie względem środka masy Galaktyki, lecz względem Słońca, znając jednak orbitę Słońca w Galaktyce potrafimy stosowną poprawkę uwzględnić. Aby galaktyka-satelita pozostawała związana grawitacyjnie z Drogą Mleczną, jej energia kinetyczna powinna być mniejsza niż wartość bezwzględna jej energii potencjalnej. Oznaczając przez M masę Galaktyki, przez R odległość satelity, a przez m jego masę, dostajemy zależność:

$$\frac{1}{2}mv^2 < \frac{GMm}{R}.$$

W rezultacie mamy dolne ograniczenie na masę Galaktyki: $M > (Rv^2)/(2G)$. Musimy jeszcze wyznaczyć odległość satelity. Wykorzystujemy w tym celu fakt, że w galaktykach karłowatych występuje pewna klasa gwiazd zmiennych o znanej mocy promieniowania. Są to gwiazdy pulsujące typu RR Lyrae. Są one stosunkowo jasne i dzięki zmienności blasku możliwe do identyfikacji nawet w galaktykach odległych o miliony lat świetlnych. Ich jasność absolutna uśredniona względem okresu pulsacji (typowe okresy wynoszą kilkanaście godzin) jest w przybliżeniu taka sama dla wszystkich obiektów tego typu i znana dzięki pomiarom odległości i obserwowanych jasności zmiennych RR Lyrae położonych blisko Słońca. Mierzac teraz obserwowane jasności tych gwiazd leżących w innych galaktykach możemy wyznaczać odległości tych właśnie odległych systemów gwiazdowych.