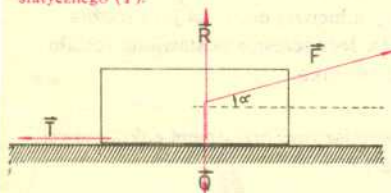




## Rozwiązanie zadania F 119.

Przyjmijmy, że na klocek działa oprócz siły ciężkości  $Q$  oraz reakcji podłoża  $R$  siła  $F$  tworząca z poziomem kąt  $\alpha$  (rysunek). Jeżeli siła ta nie jest skierowana pionowo, pojawia się dodatkowo siła tarcia. Klocek rozpocznie ruch po płaszczyźnie, gdy wartość składowej poziomej siły  $F$  będzie większa od maksymalnej siły tarcia statycznego ( $T$ ).



Z warunku równowagi siły ciężkości, siły reakcji i składowej pionowej siły  $F$  otrzymujemy

$$R = Mg - F \cdot \sin \alpha.$$

Ponadto  $T = fR$ , gdzie  $f$  — współczynnik tarcia statycznego. Klocek rozpocznie ruch, gdy

$$F \cdot \cos \alpha \geq f(Mg - F \cdot \sin \alpha).$$

Niezbędna do przesunięcia klocka siła jest więc funkcją kąta  $\alpha$  :

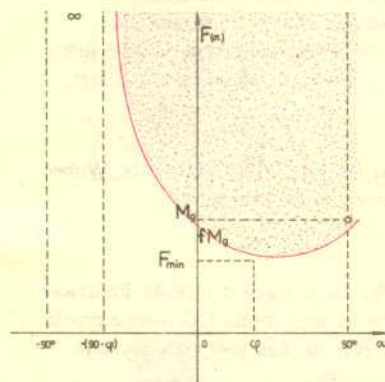
$$F(\alpha) = \frac{fMg}{\cos \alpha + f \cdot \sin \alpha}.$$

Aby znaleźć jej przebieg i poszukiwane w zadaniu minimum dokonajmy podstawienia  $f = \tan \varphi$  ( $\varphi$  nazywane bywa kątem tarcia; jaki jest sens fizyczny tego kąta?). Po przekształceniach

$$F(\alpha) = \frac{Mg \sin \varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}$$

oraz

$$F_{\min} = Mg \sin \varphi = \frac{fMg}{\sqrt{1+f^2}}.$$



Szkic wykresu  $F(\alpha)$  dla typowego przypadku  $f < 1$  zamieszczono powyżej. Klocek możemy również przesunąć popychając go (z jednoczesnym naciskiem). Jednakże przekroczenie kąta  $\varphi$  (licząc od normalnej) uniemożliwia posłizg, niezależnie od wartości przyłożonej siły. Efekt powyższy wykorzystywany bywa w wielu urządzeniach technicznych.

Jedną z fundamentalnych zasad termodynamiki — tzw. II zasada — określa zmiany entropii w izolowanych układach statystycznych, tzn. takich układach wielu cząstek, dla których zachowuje się całkowita energia, a więc nie ma wymiany informacji z otoczeniem układu. Wskutek rzeczywistych (nieodwracalnych) procesów zachodzących w takim układzie entropia układu powinna rosnąć. Entropię można interpretować (pomysł Boltzmanna) jako stopień chaosu układu, jego nieuporządkowania. Dla każdego układu można wyobrazić sobie stan chaosu kompletnego. Taki stan nie zawiera w sobie żadnej informacji i do niego powinny, według II zasady doprowadzić zachodzące w układzie procesy. Chaos to nie tylko równomierne rozprowadzenie energii po całym układzie, ale też brak jakichkolwiek struktur w rozkładzie przestrzennym cząstek.

I tu stajemy przed zagadką, na którą pierwszy zwrócił uwagę Clausius. Przyjrzyjmy się bliżej największemu z dostępnych nam układów. Wszechświat żyje i ewoluuje już 10 mld lat. Jakoś nie widać, aby w przeszłości i obecnie przejmował się obowiązkiem wprowadzania bałaganu na swoim terenie. Obserwacje wskazują raczej na coś przeciwnego. Zarówno w dużych, jak i małych skalach rodziły się i rodzą nowe obiekty: supergromady galaktyk, gromady galaktyk, galaktyki i wreszcie gwiazdy. Niewielkie zaburzenia w początkowym jednorodnym rozkładzie gęstości materii dzięki ekspansji Wszechświata narastają. Z czasem kontrast gęstości staje się znaczny i obszary zagęszczone zaczynają zapadać się grawitacyjnie. Tak powstają supergromady i gromady galaktyk. Natomiast dalsze, lokalne zagęszczanie się materii w tych obiektach prowadzi do formacji galaktyk i gwiazd.

Czy jest zatem szansa, że zgodnie z ideą II zasady termodynamiki obecne struktury zaginą i Wszechświat osiągnie stan śmierci cieplnej? W różny sposób próbowano ten problem wyjaśnić. Według Boltzmanna Wszechświat już jest w takim stanie, a obszar dostępny naszym obserwacjom stanowi gigantyczną fluktuację statystyczną. W tym obszarze została złamana II zasada (pamiętajmy o jej statystycznym charakterze). Jednakże prawdopodobieństwo powstania fluktuacji statystycznej o kosmologicznym znaczeniu jest znikome.

Większość fizyków powątpiewała natomiast w zasadność traktowania Wszechświata jako układu izolowanego.

Tymczasem istota tego paradoksu leży gdzie indziej. Entropia jest rzeczywiście miarą nieuporządkowania, ale pod warunkiem, że opisuje układ cząstek oddziałujących tylko siłami krótkozasięgowymi. A przecież Wszechświat wypełniony jest cząstkami oddziałującymi ze sobą grawitacyjnie. Całkowita energia układu to teraz nie tylko suma energii kinetycznych wszystkich cząstek. Pojawia się dodatkowo energia ich oddziaływań grawitacyjnych. Pojawiają się też nietrywialne, związane z tym konsekwencje. Dla takiej sytuacji stwierdzenie, że układ osiągnął stan maksymalnej entropii

nie jest równoważne stwierdzeniu, że

cząstki są równomiernie rozłożone w całej dostępnej im przestrzeni, a w każdym punkcie przestrzeni rozkład ich prędkości (energii) jest identyczny.

Obserwowana przez nas tendencja do koncentrowania się materii w niezależne obiekty nie stanowi pogwałcenia II zasady termodynamiki. Procesom tym towarzyszy stały wzrost entropii. Jest to możliwe, ponieważ prawdopodobieństwo zaistnienia określonego stanu układu to iloczyn prawdopodobieństwa przestrzennego rozkładu cząstek i prawdopodobieństwa tego, że cząstki mają dane prędkości. Koncentracja materii prowadzi do zmniejszenia się tego pierwszego, ale prawdopodobieństwo prędkości rośnie tak, że rośnie cały iloczyn, a co za tym idzie i entropia.

Zatem struktury o pochodzeniu grawitacyjnym w naszym Wszechświecie nie przeczą zasadzie wzrostu entropii całego Wszechświata, a z zasady wzrostu entropii nie wynika jego „śmierć cieplna”.