Kansainvälisten matematiikkaolympialaisten tehtävät ja ratkaisut 1995 – 2009

Tehtävät

36. IMO, Toronto 1995

K 1995.1. Olkoot A, B, C ja D neljä eri pistettä suoralla, tässä järjestyksessä. Ympyrät, joiden halkaisijat ovat AC ja BD leikkaavat toisensa pisteissä X ja Y. Suorat XY ja BC leikkaavat toisensa pisteessä Z. Piste P on mielivaltainen suoran XY piste, $P \neq Z$. Suora CP leikkaa AC-halkaisijaisen ympyrän pisteissä C ja M ja suora BP leikkaa BD-halkaisijaisen ympyrän pisteissä B ja N. Osoita, että suorat AM, DN ja XY kulkevat saman pisteen kautta.

K 1995.2. Olkoot a, b ja c positiivisia reaalilukuja ja olkoon $abc = 1$. Osoita, että

$$\frac{1}{a^3(b+c)} + \frac{1}{b^3(c+a)} + \frac{1}{c^3(a+b)} \geq \frac{3}{2}.$$

K 1995.3. Määritä kaikki sellaiset kokonaisluvut $n > 3$, joille on olemassa n tason pistettä $A_1, A_2, \ldots, A_n$ ja reaaliluvut $r_1, r_2, \ldots, r_n$ siten, että seuraavat ehdot ovat samanaikaisesti voimassa:

(i) Mitkään kolme pisteistä A_1, A_2, ..., A_n eivät ole samalla suoralla.

(ii) Kaikilla i, j, k $(1 \leq i < j < k \leq n)$ kolmion $A_iA_jA_k$ ala on $r_i + r_j + r_k$.

K 1995.4. Määritä suurin x_0, jolle on olemassa positiiviset reaaliluvut $x_0, x_1, \ldots, x_{1995}$, jotka toteuttavat seuraavat ehdot:

(i) $x_0 = x_{1995}$;

(ii) $x_{i-1} + \dfrac{2}{x_{i-1}} = 2x_i + \dfrac{1}{x_i}$ kaikilla $i = 1, 2, \ldots, 1995$.

K 1995.5. Olkoon $ABCDEF$ kupera kuusikulmio ja $AB = BC = CD$, $DE = EF = FA$ sekä $\angle BCD = \angle EFA = 60°$. Olkoot G ja H kaksi kuusikulmion sisäpistettä, jotka on valittu niin, että $\angle AGB = \angle DHE = 120°$. Osoita, että

$$AG + GB + GH + DH + HE \geq CF.$$

K 1995.6. Olkoon p pariton alkuluku. Määritä joukon $\{1, 2, \ldots, 2p\}$ kaikkien sellaisten osajoukkojen A lukumäärä, joille on voimassa

(i) A:ssa on tasan p alkiota ja

(ii) A:n alkioiden summa on jaollinen p:llä.

37. IMO, Mumbai 1996

K 1996.1. Suorakaiteen muotoinen pelilauta $ABCD$, missä $|AB| = 20$ ja $|BC| = 12$, on jaettu 20×12:ksi yksikköneliöksi. Olkoon r positiivinen kokonaisluku. Laudalla voidaan siirtää kolikkoa neliöstä toiseen jos ja vain jos neliöiden keskipisteiden etäisyys on $\sqrt{r}$. Tehtävänä on löytää jono siirtoja, joilla kolikko voidaan siirtää neliöstä, jonka kärki on A neliöön, jonka kärki on B.

(a) Osoita, että tehtävää ei voida suorittaa, jos r on jaollinen 2:lla tai 3:lla.

(b) Osoita, että tehtävä voidaan suorittaa, jos $r = 73$.

(c) Osoita, että tehtävä on mahdoton, jos $r = 97$.

K 1996.2. Olkoon P kolmion ABC sisäpiste ja olkoon $\angle APB - \angle ACB = \angle APC - \angle ABC$. Olkoot D ja E kolmioiden APB ja APC sisään piirrettyjen ympyröiden keskipisteet. Osoita, että AP, BD ja CE kulkevat saman pisteen kautta.

K 1996.3. Olkoon $\mathbf{S} = \{0, 1, 2, 3, \ldots\}$ ei-negatiivisten kokonaislukujen joukko. Määritä kaikki funktiot f, jotka on määritelty joukossa $\mathbf{S}$ ja joiden arvot kuuluvat joukkoon $\mathbf{S}$ ja jotka toteuttavat yhtälön

$$f(m + f(n)) = f(f(m)) + f(n)$$

kaikilla joukon $\mathbf{S}$ alkioilla m ja n.

K 1996.4. Positiiviset kokonaisluvut a ja b on valittu niin, että luvut $15a+16b$ ja $16a-15b$ ovat molemmat positiivisten kokonaislukujen neliöitä. Määritä näistä neliöistä pienemmän pienin mahdollinen arvo.

K 1996.5. Olkoon $ABCDEF$ kupera kuusikulmio ja olkoon AB ED:n kanssa yhdensuuntainen, BC FE:n kanssa yhdensuuntainen ja CD AF:n kanssa yhdensuuntainen. Olkoot R_A, R_C ja R_E kolmioiden FAB, BCD ja DEF ympäri piirrettyjen ympyröiden säteet ja p kuusikulmion piiri. Todista, että

$$R_A + R_C + R_E \geq \frac{p}{2}.$$

K 1996.6. Olkoot n, p ja q positiivisia kokonaislukuja ja $n > p + q$. Olkoot x_0, x_1, ... x_n kokonaislukuja, joille ovat voimassa seuraavat ehdot:

(a) $x_0 = x_n = 0$;

(b) kaikille kokonaisluvuille i, $1 \leq i \leq n$, pätee joko $x_i - x_{i-1} = p$ tai $x_i - x_{i-1} = -q$.

Osoita, että on olemassa indeksipari (i, j), $i < j$, $(i, j) \neq (0, n)$, jolle pätee $x_i = x_j$.

38. IMO, Mar del Plata 1997

K 1997.1. Tason kokonaislukukoordinaattiset pisteet ovat yksikköneliöiden kärkiä. Neliöt on väritetty vuorotellen mustiksi ja valkeiksi (šakkilaudan tapaan). Olkoot m ja n positiivisia kokonaislukuja. Tarkastellaan suorakulmaista kolmiota, jonka kärkien koordinaatit ovat kokonaislukuja, jonka kateettien pituudet ovat m ja n ja jonka kateetit sijaitsevat neliöiden sivuilla. Olkoon S_1 kolmion mustan osan ala ja S_2 kolmion valkean osan ala. Olkoon

$$f(m,\, n) = |S_1 - S_2|.$$

(a) Laske $f(m,\, n)$ kaikille positiivisille kokonaisluvuille m, n, jotka ovat joko molemmat parillisia tai molemmat parittomia.

(b) Todista, että $f(m,\, n) \leq \frac{1}{2}\max(m,\, n)$ kaikilla m ja n.

(c) Osoita, että ei ole olemassa vakiota C, jolle $f(m,\, n) < C$ kaikilla m ja n.

K 1997.2. Kulma A on pienin kolmion ABC kulmista. Pisteet B ja C jakavat kolmion ympäri piirretyn ympyrän kahdeksi kaareksi. Olkoon U sisäpiste sillä B:n ja C:n välisellä kaarella, jolla A ei ole. Janan AB keskinormaali leikkaa suoran AU pisteessä V ja janan AC keskinormaali leikkaa suoran AU pisteessä W. Suorat BV ja CW leikkaavat toisensa pisteessä T. Osoita, että

$$AU = TB + TC.$$

K 1997.3. Olkoot $x_1,\, x_2,\, \ldots,\, x_n$ reaalilukuja, jotka toteuttavat ehdot

$$|x_1 + x_2 + \cdots + x_n| = 1$$

ja

$$|x_i| \leq \frac{n+1}{2}, \quad \text{kun} \quad i = 1,\, 2,\, \ldots,\, n.$$

Osoita, että on olemassa jonon $x_1,\, x_2,\, \ldots,\, x_n$ permutaatio $y_1,\, y_2,\, \ldots,\, y_n$, jolle pätee

$$|y_1 + 2y_2 + \cdots + ny_n| \leq \frac{n+1}{2}.$$

K 1997.4. Kutsumme $n \times n$-neliömatriisia (neliömäistä lukutaulukkoa) *hopeamatriisiksi*, jos sen alkiot kuuluvat joukkoon $S = \{1,\, 2,\, \ldots,\, 2n-1\}$ ja jos jokaisella $i = 1,\, 2,\, \ldots,\, n$ matriisin i:nnen vaakarivin ja i:nnen pystyrivin alkioiden yhdiste sisältää S:n kaikki alkiot. Osoita, että

(a) kun $n = 1997$, hopeamatriiseja ei ole olemassa;

(b) hopeamatriiseja on olemassa äärettömän monella n:n arvolla.

K 1997.5. Määritä kaikki kokonaislukuparit $(a,\, b)$, $a \geq 1$, $b \geq 1$, jotka toteuttavat yhtälön

$$a^{b^2} = b^a.$$

K 1997.6. Olkoon n positiivinen kokonaisluku. Eri tapoja kirjoittaa n luvun 2 sellaisten potenssien summana, joiden eksponentti on ei-negatiivinen kokonaisluku, olkoon $f(n)$

kappaletta. Esityksiä, jotka eroavat toisistaan vain yhteenlaskettavien järjestyksen suhteen, pidetään samoina. Esimerkiksi $f(4) = 4$, koska 4 voidaan esittää seuraavilla neljällä tavalla: 4; $2+2$; $2+1+1$; $1+1+1+1$. Osoita, että jokaisella kokonaisluvulla $n \geq 3$ pätee

$$2^{n^2/4} < f(2^n) < 2^{n^2/2}.$$

39. IMO, Taipei 1998

K 1998.1. Kuperan nelikulmion $ABCD$ lävistäjät AC ja BD ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan ja nelikulmion vastakkaiset sivut AB ja DC eivät ole yhdensuuntaiset. Oletamme, että AB:n ja DC:n keskinormaalien leikkauspiste P on $ABCD$:n sisäpuolella. Todista, että nelikulmion $ABCD$ ympäri voidaan piirtää ympyrä, jos ja vain jos kolmioilla ABP ja CDP on sama pinta-ala.

K 1998.2. Kilpailussa on a kilpailijaa ja b tuomaria, missä $b \geq 3$ on pariton kokonaisluku. Jokainen tuomari arvostelee jokaisen kilpailijan suorituksen joko hyväksytyksi tai hylätyksi. Olkoon k sellainen luku, että jokaiset kaksi tuomaria ovat samaa mieltä enintään k:n kilpailijan suorituksista. Todista, että

$$\frac{k}{a} \geq \frac{b-1}{2b}.$$

K 1998.3. Olkoon $d(n)$ positiivisen kokonaisluvun n positiivisten tekijöiden (1 ja n mukaan lukien) lukumäärä. Määritä kaikki positiiviset kokonaisluvut k, joille pätee

$$\frac{d(n^2)}{d(n)} = k$$

jollakin kokonaisluvulla n.

K 1998.4. Määritä kaikki positiiviset kokonaislukuparit (a, b), joille $ab^2 + b + 7$ on luvun $a^2b + a + b$ tekijä.

K 1998.5. Olkoon I kolmion ABC sisään piirretyn ympyrän keskipiste. Kolmion ABC sisään piirretyn ympyrän ja kolmion sivujen BC, CA ja AB sivuamispisteet ovat K, L ja M, tässä järjestyksessä. Pisteen B kautta kulkeva MK:n suuntainen suora leikkaa suorat LM ja LK pisteissä R ja S. Osoita, että $\angle RIS$ on terävä.

K 1998.6. Tarkastellaan kaikkia positiivisten kokonaislukujen joukossa $\mathbb{N}^+$ määriteltyjä funktioita f, joiden arvot ovat positiivisia kokonaislukuja ja jotka toteuttavat ehdon

$$f\left(t^2 f(s)\right) = s\left(f(t)\right)^2$$

kaikilla s, $t \in \mathbb{N}^+$. Määritä $f(1998)$:n pienin mahdollinen arvo.

40. IMO, Bukarest 1999

K 1999.1. Määritä kaikki äärelliset tasojoukot S, joissa on vähintään kolme pistettä ja jotka täyttävät seuraavan ehdon: kun A ja B ovat joukon S kaksi eri pistettä, joukko S on symmetrinen janan AB keskinormaalin suhteen.

K 1999.2. Olkoon n kiinteä kokonaisluku, jolle $n \geq 2$. (a) Määritä pienin sellainen vakio C, että kaikilla reaalisilla $x_1, \ldots, x_n \geq 0$ pätee epäyhtälö

$$\sum_{1 \leq i < j \leq n} x_i x_j (x_i^2 + x_j^2) \leq C \left(\sum_{1 \leq i \leq n} x_i \right)^4 .$$

(b) Määritä, milloin yhtäsuuruus on voimassa, kun C on kuten yllä.

K 1999.3. Tarkastellaan $n \times n$-lautaa, missä n on kiinteä positiivinen parillinen kokonaisluku. Lauta koostuu n^2 yksikköruudusta. Kahden eri ruudun sanotaan olevan vierekkäiset, jos niillä on yhteinen sivu. Laudan N ruutua merkitään niin, että jokaisen laudan (merkityn tai merkitsemättömän) ruudun vieressä on vähintään yksi merkitty ruutu. Määritä luvun N pienin mahdollinen arvo.

K 1999.4. Määritä kaikki sellaiset positiivisten kokonaislukujen parit (n, p), että p on alkuluku, $n \leq 2p$ ja $(p-1)^n + 1$ on jaollinen luvulla n^{p-1}.

K 1999.5. Ympyrät Γ_1 ja Γ_2 sisältyvät ympyrään Γ ja sivuavat ympyrää Γ eri pisteissä M ja N. Ympyrä Γ_1 kulkee ympyrän Γ_2 keskipisteen kautta. Ympyröiden Γ_1 ja Γ_2 leikkauspisteiden kautta kulkeva suora leikkaa ympyrän Γ pisteissä A ja B. Suorat MA ja MB leikkaavat ympyrän Γ_1 pisteissä C ja D. Todista, että suora CD sivuaa ympyrää Γ_2.

K 1999.6. Määritä kaikki sellaiset kuvaukset $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$, että jokaisella $x, y \in \mathbb{R}$ on voimassa yhtälö

$$f(x - f(y)) = f(f(y)) + x\, f(y) + f(x) - 1.$$

41. IMO, Taejon 2000

K 2000.1. Ympyrät Γ_1 ja Γ_2 leikkaavat toisensa pisteissä M ja N. Olkoon l se Γ_1:n ja Γ_2:n yhteinen tangentti, joka on lähempänä M:ää kuin N:ää. Suora l sivuaa Γ_1:tä pisteessä A ja Γ_2:ta pisteessä B. Pisteen M kautta kulkeva l:n suuntainen suora leikkaa ympyrän Γ_1 myös pisteessä C ja ympyrän Γ_2 myös pisteessä D. Suorat CA ja DB leikkaavat pisteessä E; suorat AN ja CD leikkaavat pisteessä P; suorat BN ja CD leikkaavat pisteessä Q. Osoita, että $EP = EQ$.

K 2000.2. Olkoot a, b ja c positiivisia reaalilukuja ja olkoon $abc = 1$. Todista, että

$$\left(a - 1 + \frac{1}{b}\right)\left(b - 1 + \frac{1}{c}\right)\left(c - 1 + \frac{1}{a}\right) \leq 1.$$

K 2000.3. Olkoon $n \geq 2$ positiivinen kokonaisluku. Vaakasuoralla suoralla on n kirppua, jotka eivät kaikki ole samassa pisteessä. Olkoon λ positiivinen reaaliluku. Määritellään *siirtymä* seuraavasti: valitaan jotkin kaksi kirppua, jotka ovat pisteissä A ja B, A B:n vasemmalla puolella; annetaan A:ssa olevan kirpun hypätä siihen B:n oikealla puolella olevaan suoran pisteeseen C, jolle $BC/AB = \lambda$. Määritä kaikki sellaiset λ:n arvot, joilla kaikki kirput voivat siirtyä mistä hyvänsä alkuasemasta minkä hyvänsä pisteen M oikealle puolelle äärellisen monen siirtymän avulla.

K 2000.4. Taikurilla on sata korttia, jotka on numeroitu 1:stä 100:aan. Taikuri sijoittaa kortit kolmeen rasiaan, punaiseen, valkoiseen ja siniseen, niin että joka rasiassa on ainakin yksi kortti. Eräs katsojista valitsee rasioista kaksi, ottaa kummastakin rasiasta yhden kortin ja kertoo valituissa korteissa olevien numeroiden summan. Kuultuaan summan taikuri ilmoittaa, mistä rasiasta ei ole otettu kortteja. Monellako tavalla kortit voidaan sijoittaa rasioihin niin, että kuvattu temppu aina onnistuu? (Kahta sijoittelua pidetään eri sijoitteluina, jos niissä ainakin yksi kortti on eri rasiassa.)

K 2000.5. Selvitä, onko olemassa positiivista kokonaislukua n, jolle n on jaollinen tasan 2000:lla eri alkuluvulla ja $2^n + 1$ on jaollinen n:llä.

K 2000.6. Olkoot AD, BE ja CF teräväkulmaisen kolmion ABC korkeusjanat. Kolmion ABC sisään piirretty ympyrä sivuaa sivuja BC, CA ja AB pisteissä G, H ja J, tässä järjestyksessä. Olkoot suorat a, b ja c suorien EF, FD ja DE peilikuvat suorien HJ, JG ja GH yli suoritetuissa peilauksissa (tässä järjestyksessä). Todista, että a, b ja c määrittävät kolmion, jonka kärjet ovat kolmion ABC sisään piirretyn ympyrän kehällä.

42. IMO, Washington D.C. 2001

K 2001.1. Teräväkulmaisessa kolmiossa ABC on O ympäripiiretyn ympyrän keskipiste ja AP korkeusjana. Lisäksi $\angle C \geq \angle B + 30°$. Todista, että $\angle A + \angle COP < 90°$.

K 2001.2. Todista, että kaikille positiivisille luvuille a, b ja c pätee

$$\frac{a}{\sqrt{a^2+8bc}} + \frac{b}{\sqrt{b^2+8ac}} + \frac{c}{\sqrt{c^2+8ab}} \geq 1.$$

K 2001.3. Matematiikkakilpailuun osallistui 21 poikaa ja 21 tyttöä. Osoittautui, että

(a) kukin kilpailija ratkaisi enintään kuusi tehtävää ja

(b) jokaista pojan ja tytön muodostamaa paria kohden oli ainakin yksi tehtävä, jonka molemmat ratkaisivat.

Osoita, että kilpailussa oli ainakin yksi tehtävä, jonka oli ratkaissut ainakin kolme tyttöä ja kolme poikaa.

K 2001.4. Olkoon $n > 1$ pariton kokonaisluku ja olkoot $c_1, c_2, \ldots, c_n$ kokonaislukuja. Jos $a = (a_1, a_2, \ldots, a_n)$ on jonon $\{1, 2, \ldots, n\}$ permutaatio, niin merkitään

$$S(a) = \sum_{i=1}^{n} c_i a_i.$$

Todista, että on olemassa $\{1, 2, \ldots, n\}$:n permutaatiot $a \neq b$, joille $S(a) - S(b)$ on jaollinen luvulla $n!$.

K 2001.5. Kolmiossa ABC on $\angle BAC = 60°$. Piste P on $\angle BAC$:n puolittajan ja BC:n leikkauspiste ja Q $\angle ABC$:n puolittajan ja AC:n leikkauspiste. Lisäksi $AB + BP = AQ + QB$. Määritä kolmion ABC kulmien suuruudet.

K 2001.6. Olkoot a, b, c ja d, $a > b > c > d$, positiivisia kokonaislukuja. Olkoon

$$ac + bd = (b + d + a - c)(b + d - a + c).$$

Osoita, että $ab + cd$ ei ole alkuluku.

43. IMO, Glasgow, 2002

K 2002.1. Olkoon S kaikkien ei-negatiivisten kokonaislukujen h, k, joille pätee $h+k < n$, muodostamien parien $(h,\, k)$ joukko. Jokainen S:n alkio väritetään punaiseksi tai siniseksi niin, että jos $(h,\, k)$ on punainen ja $h' \le h$, $k' \le k$, niin $(h',\, k')$ on myös punainen. Joukon S osajoukko on tyyppiä 1, jos siinä on n sinistä paria, joissa on eri ensimmäinen jäsen ja tyyppiä 2, jos siinä on n sinistä paria, joissa on eri toinen jäsen. Osoita, että S:llä on yhtä monta tyypi 1 ja tyypin 2 osajoukkoa.

K 2002.2. BC on O-keskisen ympyrän halkaisija. A on mielivaltainen ympyrän kehän piste siten, että kulma $AOC > 60°$. Jänne EF on janan AO keskinormaali. D on pienemmän kaaren AB keskipiste. O:n kautta piirretty AD:n suuntainen suora leikkaa AC:n pisteessä J. Osoita, että J on kolmion CEF sisään piirretyn ympyrän keskipiste.

K 2002.3. Määritä kaikki kokonaislukujen $m > 2$, $n > 2$ parit, joille $k^n + k^2 - 1$ on luvun $k^m + k - 1$ tekijä äärettömän monella kokonaisluvulla k.

K 2002.4. Kokonaisluvun $n > 1$ positiiviset tekijät ovat $d_1 < d_2 < \ldots < d_k$ (siis $d_1 = 1$ ja $d_k = n$). Olkoon $d = d_1d_2 + d_2d_3 + \cdots + d_{k-1}d_k$. Osoita, että $d < n^2$ ja määritä ne luvut n, joille d on n^2:n tekijä.

K 2002.5. Määritä kaikki reaalimuuttujan reaaliarvoiset funktiot f, joille $(f(x) + f(y))(f(u) + f(v)) = f(xu - yv) + f(xv + yu)$ kaikilla x, y, u ja v.

K 2002.6. Tasoon on piirretty $n \ge 2$ ympyrää niin, että mikään suora ei leikkaa useampia kuin kahta näistä ympyröistä. Ympyröiden keskipisteet ovat O_1. $O_2, \ldots, O_n$. Osoita, että

$$\sum_{i<j} \frac{1}{O_iO_j} \le \frac{(n-1)\pi}{4}.$$

44. IMO, Tokio 2003

K 2003.1. Olkoon joukon $S = \{1, 2, \ldots, 1000000\}$ osajoukossa A tasan 101 alkiota. Todista, että joukossa S on sellaiset luvut $t_1, t_2, \ldots, t_{100}$, että joukot

$$A_j = \{x + t_j \mid x \in A\}, \qquad j = 1, 2, \ldots, 100,$$

ovat pareittain yhteisalkiottomia.

K 2003.2. Määritä kaikki ne positiivisten kokonaislukujen parit (a, b), joille

$$\frac{a^2}{2ab^2 - b^3 + 1}$$

on positiivinen kokonaisluku.

K 2003.3. Kuperan kuusikulmion jokaisella kahdella vastakkaisella sivulla on seuraava ominaisuus: sivujen keskipisteiden etäisyys on $\sqrt{3}/2$ kertaa sivujen pituuksien summa. Osoita, että kuusikulmion kulmat ovat yhtä suuria.

K 2003.4. Olkoon $ABCD$ jännenelikulmio. Olkoot P, Q ja R pisteen D kohtisuorat projektiot suorilla BC, CA ja AB, tässä järjestyksessä. Osoita, että $PQ = QR$, jos ja vain jos kulmien $\angle ABC$ ja $\angle ADC$ puolittajien leikkauspiste on suoralla AC.

K 2003.5. Olkoon n positiivinen kokonaisluku ja olkoot $x_1, x_2, \ldots, x_n$ reaalilukuja, joille pätee $x_1 \le x_2 \le \ldots \le x_n$.

(a) Osoita, että

$$\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}|x_i - x_j|\right)^2 \le \frac{2(n^2-1)}{3}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(x_i - x_j)^2.$$

(b) Osoita, että edellisessä epäyhtälössä vallitsee yhtäsuuruus, jos ja vain jos $x_1, x_2, \ldots, x_n$ on aritmeettinen jono.

K 2003.6. Olkoon p alkuluku. Osoita, että on olemassa sellainen alkuluku q, että $n^p - p$ ei millään kokonaisluvulla n ole jaollinen q:lla.

45. IMO, Ateena 2004

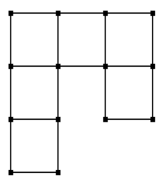
K 2004.1. Olkoon ABC teräväkulmainen kolmio ja $AB \ne AC$. Ympyrä, jonka halkaisija on BC, leikkaa sivun AB pisteessä M ja sivun AC pisteessä N. Olkoon O sivun BC keskipiste. Kulmien BAC ja MON puolittajat leikkaavat toisensa pisteessä R. Todista, että kolmioiden BMR ja CNR ympäri piirretyllä ympyröillä on yhteinen piste, joka on sivulla BC.

K 2004.2. Määritä kaikki reaalikertoimiset polynomit $P(x)$, jotka toteuttavat yhtälön

$$P(a-b) + P(b-c) + P(c-a) = 2\,P(a+b+c)$$

kaikilla ehdon $ab + bc + ca = 0$ toteuttavilla reaaliluvuilla a, b ja c.

K 2004.3. Olkoon *koukku* oheisen kuvion mukaisesti kuudesta yksikköneliöstä muodostuva kuvio tai mikä hyvänsä tästä kuviosta kierroilla tai peilauksilla muodostuva kuvio. Määritä kaikki $m \times n$-suorakaiteet, jotka voidaan peittää koukuilla niin, että suorakaide peittyy aukottomasti eivätkä koukut peitä toisiaan, mutta mikään koukku ei peitä suorakaiteen ulkopuolista aluetta.



K 2004.4. Olkoon $n \geq 3$ kokonaisluku ja olkoot t_1, t_2, …, t_n positiivisia reaalilukuja, joille on voimassa

$$n^2 + 1 > (t_1 + t_2 + \cdots + t_n)\left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \cdots + \frac{1}{t_n}\right).$$

Osoita, että t_i, t_j, t_k ovat kaikilla i, j, k, $1 \leq i < j < k \leq n$, kolmion sivujen pituuksia.

K 2004.5. Kuperan nelikulmion $ABCD$ lävistäjä BD ei ole kulman ABC eikä kulman CDA puolittaja. Piste P on nelikulmion $ABCD$ sisällä ja toteuttaa ehdot

$$\angle PBC = \angle DBA \quad \text{ja} \quad \angle PDC = \angle BDA.$$

Todista, että $ABCD$ on jännenelikulmio, jos ja vain jos $AP = CP$.

K 2004.6. Positiivista kokonaislukua kutsutaan *vuorottelevaksi*, jos sen kymmenjärjestelmäesityksessä jokaisesta kahdesta peräkkäisestä numerosta toinen on parillinen ja toinen pariton. Määritä kaikki positiiviset kokonaisluvut, joilla on vuorotteleva monikerta.

46. IMO, Mérida 2005

K 2005.1. Tasasivuisen kolmion ABC sivuilta valitaan kuusi pistettä: A_1 ja A_2 sivulta BC, B_1 ja B_2 sivulta CA ja C_1 sekä C_2 sivulta AB. Pisteet muodostavat kuperan kuusikulmion $A_1A_2B_1B_2C_1C_2$, jonka sivut ovat yhtä pitkiä. Osoita, että suorat A_1B_2, B_1C_2 ja C_1A_2 leikkaavat toisensa samassa pisteessä.

K 2005.2. Kokonaislukujonossa a_1, a_2, … on äärettömän monta positiivista ja äärettömän monta negatiivista jäsentä. Oletetaan, että jokaisella positiivisella kokonaisluvulla n lukujen a_1, a_2, …, a_n jakojäännökset n:llä jaettaessa ovat n eri lukua. Osoita, että jokainen kokonaisluku esiintyy tässä jonossa täsmälleen kerran.

K 2005.3. Positiiviset reaaliluvut x, y ja z toteuttavat ehdon $xyz \geq 1$. Todista, että

$$\frac{x^5 - x^2}{x^5 + y^2 + z^2} + \frac{y^5 - y^2}{y^5 + z^2 + x^2} + \frac{z^5 - z^2}{z^5 + x^2 + y^2} \geq 0.$$

K 2005.4. Tarkastellaan kaavan

$$a_n = 2^n + 3^n + 6^n - 1, \quad n = 1, 2, \ldots,$$

määrittelemää lukujonoa $a_1, a_2, \ldots$. Määritä kaikki positiiviset kokonaisluvut, joilla ei ole yhteistä tekijää jonon minkään luvun kanssa.

K 2005.5. Kuperassa nelikulmiossa $ABCD$ sivut BC ja AD ovat yhtä pitkät mutta erisuuntaiset. Olkoon E sivun BC ja F sivun AD sisäpiste ja olkoon $BE = DF$. Suorat AC ja BD leikkaavat pisteessä P, suorat BD ja EF leikkaavat pisteessä Q ja suorat EF ja AC leikkaavat pisteessä R. Tarkastellaan kaikkia kolmioita PQR, kun E ja F liikkuvat. Osoita, että näiden kolmioiden ympäri piirretyillä ympyröillä on P:n lisäksi toinenkin yhteinen piste.

K 2005.6. Matematiikkakilpailussa oli 6 tehtävää. Mitkä tahansa kaksi näistä tehtävistä ratkaisi yli $\frac{2}{5}$ kilpailijoista. Kukaan kilpailijoista ei ratkaissut kaikkia kuutta tehtävää. Osoita, että ainakin kaksi kilpailijoista ratkaisi tasan 5 tehtävää.

47. IMO, Ljubljana 2006

K2006.1. Kolmion ABC sisään piirretyn ympyrän keskipiste on I. Kolmion sisäpiste P toteuttaa ehdon

$$\angle PBA + \angle PCA = \angle PBC + \angle PCB.$$

Osoita, että $AP \geq AI$ ja että yhtäsuuruus vallitsee, jos ja vain jos $P = I$.

K2006.2. Kutsumme säännöllisen 2006-kulmion P lävistäjää *hyväksi janaksi*, jos sen päätepisteet jakavat P:n piirin kahteen osaan, joista kumpikin koostuu parittomasta määrästä P:n sivuja. Myös P:n sivuja pidetään *hyvinä janoina*. Monikulmio P jaetaan kolmioiksi 2003:lla lävistäjällä, jotka eivät leikkaa toisiaan P:n sisällä. Määritä sellaisten jaossa syntyvien tasakylkisten kolmioiden, joiden sivuista kaksi on hyviä janoja, suurin mahdollinen lukumäärä.

K2006.3. Määritä pienin reaaliluku M, jolle epäyhtälö

$$|ab(a^2 - b^2) + bc(b^2 - c^2) + ca(c^2 - a^2)| \leq M(a^2 + b^2 + c^2)^2$$

toteutuu kaikilla reaaliluvuilla a, b ja c.

K2006.4. Määritä kaikki kokonaislukuparit (x, y), jotka toteuttavat yhtälön

$$1 + 2^x + 2^{2x+1} = y^2.$$

K2006.5. Kokonaislukukertoimisen polynomin P aste on n, $n > 1$. Olkoon k mielivaltainen positiivinen kokonaisluku. Tarkastellaan polynomia

$$Q(x) = P(P(\ldots P(P(x))\ldots)),$$

missä P esiintyy k kertaa. Todista, että on olemassa enintään n kokonaislukua t, joille pätee $Q(t) = t$.

K2006.6. Liitetään jokaiseen kuperan monikulmion P sivuun b suurimman sellaisen kolmion ala, joka on kokonaan P:n sisällä ja jonka yksi sivu on b. Osoita, että kaikkiin P:n sivuihin liitettyjen alojen summa on ainakin kaksi kertaa P:n ala.

48. IMO, Hanoi 2007

K2007.1 On annettu reaaliluvut $a_1, a_2, \ldots, a_n$. Jokaiselle i, $1 \leq i \leq n$, määritellään

$$d_i = \max\{a_j \mid 1 \leq j \leq i\} - \min\{a_j \mid i \leq j \leq n\}.$$

Olkoon

$$d = \max\{d_i \mid 1 \leq i \leq n\}.$$

(a) Osoita, että mielivaltaisille reaaliluvuille $x_1 \leq x_2 \leq \ldots \leq x_n$ pätee

$$\max\{|x_i - a_i| \mid 1 \leq i \leq n\} \geq \frac{d}{2}. \qquad (*)$$

(b) Osoita, että on olemassa reaaliluvut $x_1 \leq x_2 \leq \ldots \leq x_n$, joille epäyhtälössä $(*)$ vallitsee yhtäsuuruus.

K2007.2 Pisteet A, B, C, D ja E sijaitsevat niin, että $ABCD$ on suunnikas ja $BCED$ on jännenelikulmio. Suora ℓ kulkee pisteen A kautta. Oletetaan, että ℓ leikkaa janan DC sen sisäpisteessä F ja suoran BC pisteessä G. Oletetaan, että $EF = EG = EC$. Todista, että ℓ on kulman DAB puolittaja.

K2007.3 Matematiikkakilpailun osallistujista jotkut ovat toistensa ystäviä; ystävyys on aina molemminpuolista. Sanomme, että jokin kilpailijoiden joukko on *klikki*, jos kaikki sen jäsenet ovat toistensa ystäviä. (Erityisesti joukot, joissa on vähemmän kuin kaksi alkiota, ovat klikkejä.) Sanomme klikin jäsenten lukumäärää klikin *kooksi*.

Tiedetään, että tässä kilpailussa klikkien suurin koko on parillinen. Todista, että kilpailijat voidaan jakaa kahteen huoneeseen niin, että suurikokoisin toisessa huoneessa oleva klikki on samankokoinen kuin suurikokoisin toisessa huoneessa oleva klikki.

K2007.4 Kolmion ABC kulman BCA puolittaja leikkaa kolmion ympäri piirretyn ympyrän myös pisteessä R, kolmion sivun BC keskinormaalin pisteessä P ja sivun AC keskinormaalin pisteessä Q. Sivun BC keskipiste on K ja sivun AC keskipiste on L. Osoita, että kolmioilla RPK ja RQL on sama ala.

K2007.5 Olkoot a ja b positiivisia kokonaislukuja. Todista, että jos luku $4ab-1$ on luvun $(4a^2-1)^2$ tekijä, niin $a = b$.

K2007.6 Olkoon n positiivinen kokonaisluku. Tarkastellaan kolmiulotteisen avaruuden $(n+1)^3 - 1$ pistettä sisältävää joukkoa

$$S = \{(x,\, y,\, z) \mid x,\, y,\, z \in \{0,\, 1,\, \ldots,\, n\},\, x+y+z > 0\}\,.$$

Mikä on pienin määrä tasoja, joiden yhdiste sisältää joukon S pisteet, muttei pistettä $(0,\, 0,\, 0)$?

49. IMO, Madrid 2008

K2008.1. Teräväkulmaisen kolmion ABC korkeusjanojen leikkauspiste on H. Pisteen H kautta kulkeva ympyrä, jonka keskipiste on sivun BC keskipiste, leikkaa suoran BC pisteissä A_1 ja A_2. Vastaavasti pisteen H kautta kulkeva ympyrä, jonka keskipiste on sivun CA keskipiste, leikkaa suoran CA pisteissä B_1 ja B_2, ja pisteen H kautta kulkeva ympyrä, jonka keskipiste on sivun AB keskipiste, leikkaa suoran AB pisteissä C_1 ja C_2. Osoita, että pisteet A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 ja C_2 ovat samalla ympyrällä.

K2008.2. (a) Todista, että

$$\frac{x^2}{(x-1)^2} + \frac{y^2}{(y-1)^2} + \frac{z^2}{(z-1)^2} \geq 1$$

kaikille reaaliluvuille x, y ja z, jotka ovat eri suuria kuin 1 ja joille pätee $xyz = 1$.

(b) Osoita, että äärettömän monella rationaalilukukolmikolla x, y, z, missä kaikki luvut ovat eri suuria kuin 1 ja $xyz = 1$, edellisessä epäyhtälössä vallitsee yhtäsuuruus.

K2008.3. Osoita, että on olemassa äärettömän monta sellaista positiivista kokonaislukua n, jolle luvulla n^2+1 on lukua $2n + \sqrt{2n}$ suurempi alkutekijä.

K2008.4. Määritä kaikki funktiot $f : (0, \infty) \to (0, \infty)$ (f on siis positiivisten reaalilukujen joukossa määritelty funktio, jonka arvot ovat positiivisia reaalilukuja), joille pätee

$$\frac{\big(f(w)\big)^2 + \big(f(x)\big)^2}{f(y^2) + f(z^2)} = \frac{w^2 + x^2}{y^2 + z^2}$$

kaikilla positiivisilla reaaliluvuilla w, x, y ja z, jotka toteuttavat ehdon $wx = yz$.

K2008.5. Olkoot n ja k, $k \geq n$, positiivisia kokonaislukuja, ja olkoon $k - n$ parillinen. Olkoon annettuna $2n$ lamppua, jotka on varustettu numeroin 1, 2, ..., $2n$ ja joista jokainen voi *palaa* tai olla *pimeänä*. Aluksi kaikki lamput ovat pimeinä. Tarkastellaan askelista koostuvia jonoja. Jokaisella askeleella jonkin lampun tila vaihdetaan päinvastaiseksi (lamppu sytytetään tai sammutetaan).

Olkoon N kaikkien sellaisten k:sta askeleesta muodostuvien jonojen lukumäärä, jotka johtavat tilaan, jossa lamput $1, \ldots, n$ palavat ja lamput $n+1, \ldots, 2n$ ovat pimeinä.

Olkoon M kaikkien sellaisten k:sta askeleesta muodostuvien jonojen lukumäärä, jotka johtavat tilaan, jossa lamput $1, \ldots, n$ palavat ja lamput $n+1, \ldots, 2n$ ovat pimeinä, mutta lamppuja $n+1, \ldots, 2n$ ei ole kertaakaan sytytetty.

Määritä suhde N/M.

K2008.6. Kuperassa nelikulmiossa $ABCD$ on $BA \neq BC$. Kolmioiden ABC ja ADC sisään piirretyt ympyrät ovat ω_1 ja ω_2. Oletetaan, että on olemassa ympyrä ω, joka sivuaa puolisuoraa BA eri puolella A:ta kuin B ja puolisuoraa BC eri puolella C:tä kuin B ja joka myös sivuaa suoria AD ja CD. Osoita, että ympyröiden ω_1 ja ω_2 yhteisten ulkopuolisten tangenttien leikkauspiste on ympyrällä ω.

50. IMO, Bremen 2009

K2009.1. Olkoon n positiivinen kokonaisluku ja olkoot $a_1, \ldots, a_k$ ($k \geq 2$) joukon $\{1, \ldots, n\}$ eri lukuja niin, että $a_i(a_{i+1} - 1)$ on jaollinen n:llä, kun $i = 1, \ldots, k-1$. Osoita, että $a_k(a_1 - 1)$ ei ole jaollinen n:llä.

K2009.2. Olkoon ABC kolmio ja O sen ympäri piirretyn ympyrän keskipiste. Piste P on sivun CA sisäpiste ja piste Q sivun AB sisäpiste. Pisteet K, L ja M ovat janojen BP, CQ ja PQ keskipisteet, tässä järjestyksessä, ja Γ on pisteiden K, L ja M kautta kulkeva ympyrä. Oletetaan, että suora PQ on ympyrän Γ tangentti. Osoita, että $OP = OQ$.

K2009.3. Oletetaan, että $s_1, s_2, s_3, \ldots$ on aidosti kasvava positiivisten kokonaislukujen jono ja että molemmat osajonot

$$s_{s_1}, s_{s_2}, s_{s_3}, \ldots \qquad \text{ja} \qquad s_{s_1+1}, s_{s_2+1}, s_{s_3+1}, \ldots$$

ovat aritmeettisia jonoja. Osoita, että myös jono $s_1, s_2, s_3, \ldots$ on aritmeettinen jono.

K2009.4. Olkoon ABC kolmio, jossa $AB = AC$. Kulmien CAB ja ABC puolittajat leikkaavat sivut BC ja CA pisteissä D ja E, tässä järjestyksessä. Olkoon K kolmion ADC sisään piirretyn ympyrän keskipiste. Oletetaan, että $\angle BEK = 45°$. Määritä $\angle CAB$:n kaikki mahdolliset arvot.

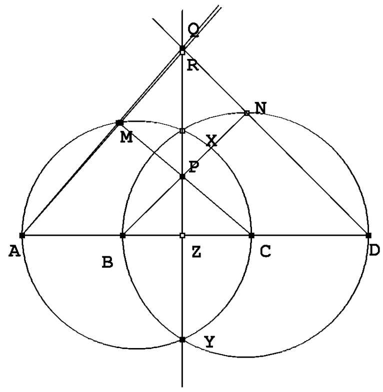
K2009.5. Määritä kaikki sellaiset positiivisten kokonaislukujen joukossa määritellyt funktiot f, joiden arvot ovat positiivisia kokonaislukuja ja joilla on seuraava ominaisuus: kaikilla positiivisilla kokonaisluvuilla a ja b on olemassa (ei-surkastunut) kolmio, jonka sivujen pituudet ovat

$$a, \quad f(b) \quad \text{ja} \quad f(b+f(a)-1).$$

K2009.6. Olkoot $a_1, a_2, \ldots, a_n$ keskenään eri suuria positiivisia kokonaislukuja ja olkoon M joukko, jonka alkiot ovat $n-1$ positiivista kokonaislukua, joista mikään ei ole $s = a_1 + a_2 + \cdots + a_n$. Heinäsirkka hyppelee reaaliakselilla. Se lähtee origosta ja tekee n hyppyä oikealle. Hyppyjen pituudet ovat $a_1, a_2, \ldots, a_n$ jossain järjestyksessä. Osoita, että heinäsirkka voi järjestää hyppynsä niin, ettei se milloinkaan osu pisteeseen, jonka koordinaatti on joukossa M.

Ratkaisuja

K 1995.1. Olkoon Q suorien DN ja XY leikkauspiste ja olkoon R suorien AM ja XY leikkauspiste. Koska $\angle AMC = 90° = \angle AZP$, niin kolmiot PCZ, CAM ja RAZ ovat suorakulmaisia. Lisäksi kolmioilla on pareittain yhteinen kulma. Kolmiot, erityisesti PCZ ja RAZ, ovat siis yhdenmuotoisia. Samoin nähdään, että kolmiot PBZ ja QDZ ovat yhdenmuotoisia. Siis



$$\frac{ZP}{CZ} = \frac{AZ}{ZR} \quad \text{ja} \quad \frac{ZP}{BZ} = \frac{DZ}{ZQ}.$$

Mutta jos lasketaan pisteen Z potenssi molempien tehtävässä esiintyvien ympyröiden suhteen, saadaan

$$AZ \cdot CZ = ZX \cdot ZY = BZ \cdot DZ.$$

Siis $ZP\cdot ZR = CZ\cdot AZ = BZ\cdot DZ = ZP\cdot ZQ$. Kun supistetaan ZP:llä, saadaan $ZR = ZQ$. Koska R ja Q ovat samalla puolella suoraa AD, on oltava $R = Q$. – Huomattakoon, että päättely ei riipu siitä, onko P janalla XY vai sen ulkopuolella. (*Tuomas Korppi, Jukka Suomela, Toni Leppäkorpi*)

K 1995.2. Merkitään $x = \frac{1}{a}$, $y = \frac{1}{b}$ ja $z = \frac{1}{c}$. Silloin $xyz = 1$ ja

$$\frac{1}{a^3(b+c)} + \frac{1}{b^3(c+a)} + \frac{1}{c^3(a+b)} \geq \frac{3}{2} = \frac{x^3yz}{y+z} + \frac{xy^3z}{x+z} + \frac{xyz^3}{x+y} = \frac{x^2}{y+z} + \frac{y^2}{x+y} + \frac{z^2}{x+y}.$$

Voidaan olettaa, että $x \leq y \leq z$, jolloin myös $\frac{1}{y+z} \leq \frac{1}{z+x} \leq \frac{1}{x+y}$. Käytetään ensin Tšebyševin epäyhtälöä, jonka mukaan $3\left(\frac{x^2}{y+z} + \frac{y^2}{x+y} + \frac{z^2}{x+y}\right) \geq (x^2 + y^2 + z^2)\left(\frac{1}{y+z} + \frac{1}{x+z} + \frac{1}{x+y}\right)$, ja sitten aritmeettisen ja harmonisen keskiarvon välistä epäyhtälöä, jonka mukaan $\frac{1}{3}\left(\frac{1}{y+z} + \frac{1}{x+z} + \frac{1}{x+y}\right) \geq \frac{3}{y+z+x+z+x+y} = \frac{3}{2}\frac{1}{x+y+z} = \frac{3}{2}\frac{1}{(x+y+z)\sqrt[3]{xyz}}$. Aritmeettisen ja geometrisen keskiarvon välisen epäyhtälön perusteella edelleen $\frac{1}{\sqrt[3]{xyz}} \geq \frac{3}{x+y+z}$. Näin on päästy epäyhtälöön

$$\frac{x^2}{y+z} + \frac{y^2}{z+x} + \frac{z^2}{x+y} \geq \frac{9}{2}\frac{x^2+y^2+z^2}{(x+y+z)^2}.$$

Tehtävän epäyhtälöön päästään tästä käyttämällä nimittäjään Cauchyn – Schwarzin epäyhtälöä muodossa $(x+y+z)^2 = (1\cdot x + 1\cdot y + 1\cdot z)^2 \leq (1+1+1)(x^2+y^2+z^2) = 3(x^2+y^2+z^2)$. (*Uoti Urpala*)

K 1995.3. Havaitaan heti, että jos $n = 4$, pisteet A_1, A_2, A_3 ja A_4, jotka ovat sellaisen neliön kärjet, jonka ala on $6a$, toteuttavat tehtävän ehdot, kun kaikki r_i:t ovat $= a$. Todistetaan sitten, että vaadittuja pisteitä ei ole, jos $n = 5$. Jos pisteet A_1, A_2, A_3 ja A_4 ovat kuperan nelikulmion kärjet ja nelikulmion ala on A, niin $A = (r_1 + r_2 + r_3) + (r_1 + r_3 + r_4) = (r_1 + r_2 + r_4) + (r_2 + r_3 + r_4)$, mistä seuraa $r_2 + r_4 = r_1 + r_3$. Oletetaan nyt, että pisteet $A_1, \ldots A_5$ ja luvut $r_1, \ldots, r_5$ toteuttaisivat tehtävän ehdot. Pisteet voivat sijaita tasossa kolmella eri tavalla:

1°. Pisteet ovat kuperan viisikulmion kärjet. Silloin jokaiset neljä pisteistä ovat kuperan nelikulmion kärjet, ja edellä todistettua relaatiota hyväksi käyttäen saadaan $r_2 + r_5 = r_1 + r_3 = r_2 + r_4$, $r_1 + r_4 = r_2 + r_5 = r_1 + r_3$ jne., ja näistä $r_5 = r_4 = r_3 = r_2 = r_1$. Tämä merkitsee, että kolmiot $A_1A_2A_3$ ja $A_1A_2A_4$ ovat yhtä suuret. Viisikulmion kuperuuden vuoksi A_4 ja A_3 ovat samalla puolella suoraa A_1A_2. Koska myös kolmiot $A_3A_4A_2$ ja $A_3A_4A_5$ ovat yhtä suuret, A_5 on yhtä etäällä suorasta A_3A_4 kuin A_2. Jos pisteet olisivat samalla puolella suoraa A_3A_4, A_5, A_1 ja A_2 olisivat samalla suoralla. Siis A_5 on kaksi kertaa niin kaukana suorasta A_1A_2 kuin A_3. Tämä on selvästi ristiriidassa sen kanssa, että kolmioilla $A_1A_2A_3$ ja $A_1A_2A_5$ on sama ala.

2°. Neljä pisteistä, esim. $A_1, \ldots, A_4$ ovat kuperan nelikulmion kärjet ja viides on tämän nelikulmion sisällä. Pisteiden numerointi voidaan valita niin, että A_5 on kolmion $A_2A_4A_1$ sisällä. Kun sovelletaan alussa todistettua yhtälöä kuperiin nelikulmioihin $A_1A_2A_3A_4$ ja $A_5A_2A_3A_4$, saadaan $r_1 + r_3 = r_2 + r_4 = r_5 + r_3$, eli $r_1 = r_5$. Tämä merkitsee, että kolmioilla $A_2A_4A_1$ ja $A_2A_4A_5$ on sama ala, mikä on ristiriidassa sen kanssa, että piste A_5 on kolmion $A_2A_4A_1$ sisällä.

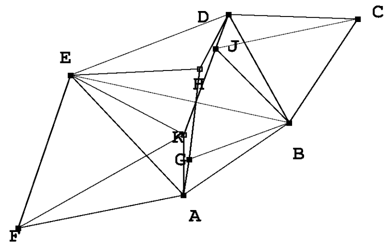
3°. Mitkään neljä pistettä eivät ole kuperan nelikulmion kärjet. Silloin pisteistä löytyy kolme sellaista, esim. A_1, A_2 ja A_3, että kaksi muuta pistettä ovat näiden kolmen pisteen muodostaman kolmion sisäpisteitä. Numerointi voidaan tehdä niin, että lisäksi A_5 on kolmion $A_1A_2A_4$ sisällä. Kun kolmion $A_1A_2A_3$ ala lasketaan kahdella eri tavalla, saadaan $r_1 + r_2 + r_3 = (r_1 + r_2 + r_5) + (r_2 + r_3 + r_5) + (r_3 + r_1 + r_5)$, eli $r_5 = -\dfrac{1}{3}(r_1 + r_2 + r_3)$. Täsmälleen samoin saadaan $r_4 = -\dfrac{1}{3}(r_1 + r_2 + r_3)$. Siis kolmioilla $A_1A_2A_5$ ja $A_1A_2A_4$ on sama ala, mikä on mahdotonta samoin perustein kuin kohdassa 2°.

Jos $n > 5$, voidaan aina valita viisi pistettä ja rajoittaa tarkastelu niihin. Tehtävällä ei siis ole muita ratkaisuja kuin $n = 4$. (*Tuomas Korppi*)

K 1995.4. Kun x_i ratkaistaan yhtälöstä (ii), saadaan kaksi ratkaisua, $x_i = \dfrac{1}{x_{i-1}}$ ja $x_i = \dfrac{x_{i-1}}{2}$. Induktiivisesti todetaan, että jokainen x_i on muotoa $2^k x_0^{\pm 1}$, missä k on kokonaisluku; siirtyminen luvusta x_{i-1} lukuun x_i aiheuttaa joko k:n pienenemisen yhdellä tai sekä k:n että x_0:n eksponentin muuttumisen vastaluvukseen. Jos x_0:sta x_{1995}:een siirryttäessä olisi tehty parillinen määrä käänteislukuoperaatioita, olisi $|k|$:ta jouduttu muuttamaan pariton määrä kertoja. Silloin olisi $x_{1995} = 2^{2\ell+1}x_0$, eikä voisi olla $x_{1995} = x_0$. Käänteislukuoperaatioita on siis ollut pariton määrä, ja $x_{1995} = 2^{2\ell}x_0^{-1} = x_0$, josta $x_0 = 2^{\ell}$. Koska käänteisoperaatioita on ollut ainakin yksi, on 2ℓ enintään 1994. Siis $x_0 \le 2^{997}$. Helposti nähdään, että jos $x_0 = 2^{997}$, niin jono, jossa $x_i = \dfrac{x_{i-1}}{2}$, kun $i = 1, 2, \ldots, 1994$ ja

$x_{1995} = \dfrac{1}{x_{1994}}$, toteuttaa tehtävän ehdot. Suurin x_0 on siis 2^{1995}. (*Toni Leppäkorpi*)

K 1995.5. Havaitaan, että kolmiot BCD ja AEF ovat tasasivuisia. Näin ollen $BA = BC = BD$ ja $DE = EA = EF$. Kolmiot ABE ja DBE ovat yhtenevät, joten $BDEA$ on symmetrinen suoran BE suhteen. Olkoot J ja K pisteiden G ja H kuvat peilauksessa yli suoran BE. Silloin $GH = JK$, $AG = DJ$, $GB = JB$, $DH = AK$ ja $HE = KE$. Pisteet A, B ja G ovat sellaisen ympyrän kehällä, jonka keskipisteestä jana AB näkyy $120°$:n kulmassa (kehäkulmaa $120°$ vastaa keskuskulma $240° = 360° - 120°$).



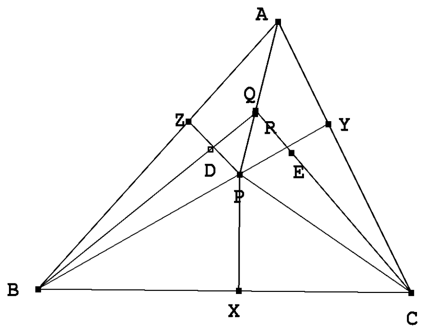
Peilauksessa tämän ympyrän keskipiste kuvautuu kolmion BCD keskipisteeksi, sillä jana BD näkyy pisteestä C $60°$:n kulmassa. On tunnettua, että mielivaltaiselle pisteelle J tasasivuisen kolmion BCD ympäri piirretyn ympyrän kaarella BD pätee $CJ = BJ + DJ$. (Todistus: Valitaan CJ:ltä piste L niin, etä JLD on tasasivuinen kolmio. Silloin $\angle CDL = 60° - \angle LDB = \angle BDJ$. Kehäkulmalauseen nojalla $\angle JBD = \angle JCD$. Koska $BD = CD$, kolmiot CDL ja BDJ ovat yhtenevät (ksk). Siis $CL = BJ$ ja $LJ = LD = JD$ ja $CJ = CL + LJ = BJ + DJ$.) Samoin nähdään, että $FK = EK + AK$. Nyt saadaan $AG + GB + GH + DH + HE = BJ + DJ + JK + AK + EK = CJ + JK + KF \geq CF$, sillä jana CF on enintään yhtä pitkä kuin mikä tahansa pisteet C ja F yhdistävä murtoviiva. (*Jouni Seppänen*)

K 1995.6. Joukot $\{1, 2, \ldots, p\}$ ja $\{p+1, p+2, \ldots, 2p\}$ toteuttavat ehdot: ensimmäisen alkioiden summa on $\dfrac{p(p+1)}{2}$ ja jälkimmäisen $\dfrac{p(p+1)}{2} + p^2$. Tarkastellaan muita p-alkioisia osajoukkoja; niitä on $\dbinom{2p}{p} - 2$. Merkitään joukon A alkioiden summaa symbolilla $g(A)$. Osoitetaan, että jokaista r, $0 \leq r < p$ kohden on yhtä monta osajoukkoa A, jolle $g(A) \equiv r \bmod p$. Tästä seuraa erityisesti, että osajoukkoja, joille $g(A) \equiv 0 \bmod p$, on $\dfrac{1}{p}\left(\dbinom{2p}{p} - 2\right) + 2$ kappaletta. Tämän osoittamiseksi tarkastellaan p-alkioisten osajoukkojen S joukossa määriteltyä funktiota f, joka määritellään seuraavasti: jos $n \geq p+1$, niin $n \in S \Leftrightarrow n \in f(S)$, jos $2 \leq n \leq p$, niin $n - 1 \in S \Leftrightarrow n \in f(S)$ ja $p \in S \Leftrightarrow 1 \in f(S)$. Jos joukossa S on m alkiota, jotka ovat $\leq p$, niin $g(f(S)) = g(S) + m \bmod p$. Lisäksi $f^p(S) = S$ aina kun S:ssä on m, $1 \leq m \leq p-1$ alkiota, jotka ovat $\leq p$. Tästä seuraa, että f on bijektio. Koska p on alkuluku, kongruenssiyhtälöllä $mx \equiv q \bmod p$ on yksikäsitteinen ratkaisu r. Tarkastellaan joukkoja, joilla tasan m luvuista $1, 2, \ldots, p$ kuuluu joukkoon S. Tällaiselle joukolle $g(S) \equiv 0$ jos ja vain jos $g(f^r(S)) \equiv q$. Näin saadaan yksikäsitteinen vastaavuus niiden joukkojen, joille $g(S) \equiv 0$, ja niiden joukkojen, joille $g(S) \equiv q$, kanssa. Tällaisia joukkoja on siis yhtä paljon. (*Uoti Urpala*)

K 1996.1. Siirrytään tarkastelemaan pisteiden (i, j), $0 \leq i \leq 19$, $0 \leq j \leq 11$, muodostamaa hilaa $\mathcal{A}$. Tehtävä on löytää siirrot, joilla päästään pisteestä $(0, 0)$ pisteeseen $(0, 19)$. Siirrot ovat muotoa $(x, y) \to (x + a, y + b)$, missä $a^2 + b^2 = r$. (a) Jos r on parillinen, niin a ja b ovat joko molemmat parillisia tai molemmat parittomia. Siis $a + b$ on aina parillinen.

Pisteestä (x, y), jossa $x + y$ on parillinen (kuten $(0, 0)$) ei voi päästä pisteeseen (x', y'), missä $x' + y'$ on pariton (kuten $(0, 19)$). Jos r on jaollinen kolmella, sekä a:n että b:n tulee olla jaollisia kolmella. (Jos x ei ole jaollinen kolmella, niin $x^2 \equiv 1 \bmod 3$.) Koska 19 ei ole jaollinen kolmella, tehtävä ei onnistu. (b) Olkoon $r = 73 = 8^2 + 3^2$. Merkitään a:lla, b:llä, c:llä ja d:llä siirtojen $\pm(8, 3)$, $\pm(8, -3)$, $\pm(3, 8)$ ja $\pm(3, -8)$ lukumäärää (a on tarkemmin sanoen siirtojen $(8, 3)$ ja $(-8, -3)$ lukumäärien erotus.) Onnistuneessa siirtosarjassa on oltava $8(a+b)+3(c+d) = 19$ ja $3(a-b)+8(c-d) = 0$. Eräs nämä ehdot toteuttava ratkaisu olisi $(a+b, c+d) = (2, 1)$, $(a-b, c-d) = (2, -1)$ eli $a = -3$, $b = 5$, $c = 2$, $d = -1$. Yritetään ratkaisua kolmella muotoa $(-8, -3)$, viidellä muotoa $(8, -3)$, kahdella muotoa $(3, 8)$ ja yhdellä muotoa $(-3, 8)$ olevalla siirrolla. Osoittautuu, että $(0, 0) \to (3, 8) \to (11, 5) \to (19, 2) \to (16, 10) \to (8, 7) \to (0, 4) \to (8, 1) \to (11, 9) \to (3, 6) \to (11, 3) \to (19, 0)$ on kelvollinen siirtojono. (c) Olkoon $r = 97$. Ainoa mahdollisuus kirjoittaa 97 kahden neliön summaksi on $9^2 + 4^2$. Jaetaan hila $\mathcal{A}$ kahdeksi joukoksi $\mathcal{B} = \{(i, j) \mid 0 \le i \le 19, 4 \le j \le 7\}$, $\mathcal{C} = \mathcal{A} \setminus \mathcal{B}$. Selvästi jokainen siirto $(\pm 9, \pm 4)$ johtaa joukosta $\mathcal{B}$ joukkoon $\mathcal{C}$ ja päinvastoin, kun taas jokainen muotoa $(\pm 4, \pm 9)$ oleva siirto johtaa joukosta $\mathcal{C}$ joukkoon $\mathcal{C}$. Edellisen tyypin siirrot muuttavat x-koordinaatin parillisuuden, joten niitä pitäisi olla pariton määrä. Mutta koska lähtöpiste on $\mathcal{C}$:ssä, jokainen tällainen siirtosarja johtaa joukon $\mathcal{B}$ pisteeseen. Tapauksessa $r = 97$ siirtoja ei voi tehdä vaaditulla tavalla.

K 1996.2. Olkoot X, Y ja Z pisteen P kohtisuorat projektiot sivuilla BC, CA ja AB. Nelikulmio $AZPY$ on jännenelikulmio ja PA nelikulmion ympäri piirretyn ympyrän halkaisija, joten laajennettu sinilause sovellettuna kolmioon AZY antaa



$$\frac{YZ}{\sin A} = PA.$$

Samoin

$$\frac{ZX}{\sin B} = PB, \quad \frac{XY}{\sin C} = PC.$$

Jännenelikulmioista ja kolmion kulmien summalauseesta saadaan myös

$$\angle XYZ = \angle XYP + \angle PYZ = \angle BCP + \angle PAB = \angle APC - \angle ABC.$$

Vastaavasti $\angle YZX = \angle BPA - \angle ACB$. Tehtävän oletuksen perusteella $\angle XYZ = \angle XZY$, joten kolmio XYZ on tasakylkinen, $XY = XZ$. Laajennettu sinilause kolmioihin BXZ ja CYX sovellettuna antaa $PB \sin B = PC \sin C$. Tästä ja sinilauseesta kolmioon ABC sovellettuna seuraa $PB \cdot AC = PC \cdot AB$ eli

$$\frac{PB}{AB} = \frac{PC}{AC}.$$

Olkoot Q ja R pisteet, joissa BD ja CE leikkaavat AP:n. Kulmanpuolittajalause ja edellinen yhtälö osoittavat, että

$$\frac{PQ}{QA} = \frac{PR}{RQ},$$

joten $Q = R$.

K 1996.3. Nollafunktio $f(x) = 0$ kaikilla x on yksi ratkaisu. Sijoittamalla $m = n = 0$ funktionaaliyhtälöön saadaan $f(0) = 0$ ja $f(f(n)) = f(n)$ kaikilla n. Tutkittava funktionaaliyhtälö on siis

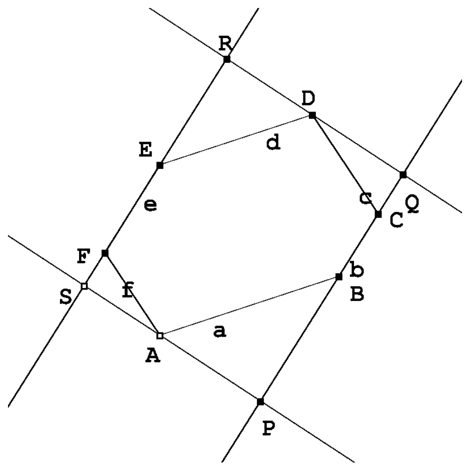
$$f(m + f(n)) = f(m) + f(n).$$

Jos f ei ole identtisesti nolla, on olemassa lukuja x, joille $f(x) = x$; näitä kutsutaan f:n kiintopisteiksi. Olkoon a pienin tällainen luku. Induktiolla näytetään, että $f(ka) = ka$ kaikilla $k \geq 1$: oletetaan, että $f(ka) = ka$, $k \geq 1$. Silloin $f(a + ka) = f(a + f(ka)) = f(a)+f(ka) = (1+k)a$. Jos $a = 1$, $f(n) = n$ kaikilla n. Oletetaan, että $a > 1$. Osoitetaan, että kaikki f:n kiintopisteet ovat muotoa ka. Olkoon $b > a$ mielivaltainen kiintopiste. On olemassa q ja r, $0 \leq r < a$, siten, että $b = r + qa$. Nyt $r + qa = b = f(b) = f(r + qa) = f(r + f(qa)) = f(r) + f(qa) = f(r) + qa$, joten $r = f(r)$. Koska $r < a$, on oltava $r = 0$. Koska aikaisemmin sanotun mukaan kaikki luvut $f(n)$ ovat kiintopisteitä, on olemassa luvut $n_0 = 0$, n_1, n_2, $\ldots$, n_{a-1} siten, että $f(i) = n_i a$, $0 \leq i < a$. Jos $n > a$, niin $n = ka + i$, $0 \leq i < a$. Silloin $f(n) = f(i + ka) = n_i a + ka$. Olkoot toisaalta a, ja jos $a > 1$, n_1, n_2, $\ldots$, n_{a-1} mielivaltaisia ei-negatiivisia kokonaislukuja. Asetetaan $n_0 = 0$ ja mielivaltaiselle $n = ka + i$, $0 \leq k$, $0 \leq i < a$ $f(n) = (k + n_i)a$. Osoitetaan, että näin määritelty f toteuttaa funktionaaliyhtälön. Olkoon $n = ka + i$, $m = la + j$. Silloin todellakin $f(m + f(n)) = f(la + j + ka + n_i a) = (l + k + n_i)a + n_j a = f(m) + f(n)$.

K 1996.4. Olkoon $15a+16b = r^2$ ja $16a-15b = s^2$. Silloin $r^4+s^4 = (15a+16b)^2+(16a-15b)^2 = (15^2 + 16^2)(a^2 + b^2) = 481(a^2 + b^2) = 13 \cdot 37 \cdot (a^2 + b^2)$. Kokeilemalla (riittää, kun tutkitaan tapaukset $1 \leq r \leq 6$) nähdään helposti, että jos r ei ole 13:lla jaollinen, niin r^4 on kongruentti 1:n, 3:n tai 9:n kanssa modulo 13. r^4+s^4 on kongruentti 0:n kanssa modulo 13 vain, jos sekä r että s ovat jaollisia 13:lla. Samoin kokeilemalla (tapaukset $1 \leq r \leq 18$) nähdään, että $r^4 \equiv 1, 16, 7, 34, 33, 1, 33, 26, 12, 10, 26, 16, 34, 10, 9, 9, 12, 7 \bmod 37$. Nähdään heti, että r^4+s^4 on jaollinen 37:llä vain, jos sekä r että s ovat jaollisia 37:llä. Siis $r \geq 481$ ja $s \geq 481$. Kun asetetaan $a = 481 \cdot 31$ ja $b = 481$, nähdään, että $r = 481$ voidaan saavuttaa. Kysytty pienin neliö on siis 481^2.

K 1996.5. Oletuksen mukaisista yhdensuuntaisuusehdoista seuraa, että $\angle BAF = \angle EDC = \alpha$, $\angle CBA = \angle FED = \beta$ ja $\angle AFE = \angle DCB = \gamma$. Laajennetun sinilauseen perusteella

$$2R_A = \frac{BF}{\sin\alpha}, \quad 2R_C = \frac{BD}{\sin\gamma}, \quad 2R_E = \frac{DF}{\sin\beta}. \qquad (1)$$



Olkoot P ja S A:n kohtisuorat projektiot suorilla BC ja FE ja Q ja R vastaavasti D:n kohtisuorat projektiot näillä suorilla. Merkitään kuusikulmion sivujen AB, BC, CD, DE, EF ja FA pituuksia kirjaimilla a, b, c, d, e ja f. Silloin $PS = a\sin\beta + f\sin\gamma = QR = d\sin\beta + c\sin\gamma$, ja

$$2\,BF \geq (a\sin\beta + f\sin\gamma) + (c\sin\gamma + d\sin\beta).$$

Samoin

$$
\begin{aligned}
2\,DB &\geq (c\sin\alpha + b\sin\beta) + (f\sin\alpha + e\sin\beta),\\
2\,FD &\geq (e\sin\gamma + d\sin\alpha) + (b\sin\gamma + a\sin\alpha).
\end{aligned}
$$

Kun tämä yhdistetään epäyhtälöihin (1) ja otetaan huomioon epäyhtälö $x + x^{-1} \geq 2$, saadaan, niin kuin pitääkin,

$$
\begin{aligned}
4(R_A + R_C + R_E) &\geq a\left(\frac{\sin\beta}{\sin\alpha} + \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\right) + b\left(\frac{\sin\beta}{\sin\gamma} + \frac{\sin\gamma}{\sin\beta}\right) + \ldots + f\left(\frac{\sin\gamma}{\sin\alpha} + \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}\right)\\
&\geq 2(a + b + \ldots + f) = 2p.
\end{aligned}
$$

K 1996.6. Voidaan olettaa, että p:llä ja q:lla ei ole yhteisiä tekijöitä: jos olisi $(p,\,q) = d > 0$, niin voitaisiin siirtyä tarkastelemaan lukuja $p' = p/d$, $q' = q/d$ ja $x_i' = x_i/d$. Jos indeksejä i, joilla $x_i - x_{i-1} = p$ on k kappaletta, niin indeksejä i, joilla $x_i - x_{i-1} = -q$, on $n - k$ kappaletta. On oltava $kp = (n-k)q$, ja koska p:llä ja q:lla ei ole yhteisiä tekijöitä, on $k = aq$ ja $(n-k) = ap$ jollakin a. Tästä seuraa, että $n = a(p+q)$; koska $n > p + q$, on $a \geq 2$.

Merkitään $y_i = x_{i+p+q} - x_i$, $0 \leq i \leq n-p-q$. Jos jokin $y_i = 0$, todistus on valmis. Muussa tapauksessa tarkastellaan lukuja $x_{i+1} - x_i$, $x_{i+2} - x_{i+1}$, $\ldots$, $x_{i+p+q} - x_{i+p+q-1}$. Näistä r kappaletta olkoon $= p$ ja $p + q - r$ kappaletta olkoon $= -q$. Siis $y_i = rp - (p+q-r)q = (p+q)(r-q)$. Toisaalta $y_{i+1} - y_i = (x_{i+p+q+1} - x_{i+p+q}) - (x_{i+1} - x_i)$ on joko 0 tai $\pm(p+q)$. Koska

$$
y_0 + y_{p+q} + y_{2(p+q)} + \ldots + y_{n-p+q} = x_n - x_0 = 0,
$$

ei ole mahdollista, että kaikki $y_{l(p+q)}$:t olisivat positiivisia tai kaikki negatiivisia. Luvuista $y_{l(p+q)}$ jotkin kaksi vierekkäistä ovat siten erimerkkisiä. Koska $y_{l(p+q)}$:t ovat $(p+q)$:n kerrannaisia, ja kahden vierekkäisen erotus on itseisarvoltaan $p+q$, on jonkin y_i:n oltava nolla.

K 1997.1. (a) Voimme olettaa, että kolmion kärjet ovat $(0,\,0)$, $(0,\,m)$ ja $(m,\,n)$. Oletetaan nyt ja myöhemmin, että neliö, jonka keskipiste on $\left(\frac{1}{2},\,\frac{1}{2}\right)$, on musta. Tällöin mustia ovat täsmälleen ne neliöt, joiden keskipiste on $\left(\frac{1}{2} + k,\,\frac{1}{2} + j\right)$, missä $k + j$ on parillinen. Täydennetään kolmio suorakaiteeksi, jonka neljäs kärki on $(0,\,n)$. Jos m ja n ovat molemmat parillisia tai molemmat parittomia, 180°:n kierto kolmioiden yhteisen hypotenuusan keskipisteen ympäri kuvaa kolmion toisikseen, jokaisen valkean neliön valkeaksi neliöksi ja jokaisen mustan neliön mustaksi neliöksi. Mustan ja valkean alan erotus on kummassakin kolmiossa sama. Jos mn on parillinen, suorakaiteessa on yhtä monta valkeaa neliötä kuin mustaa, joten kummassakaan kolmiossa ei voi olla toista väriä enemmän kuin toista. Tässä tapauksessa $S_1 - S_2 = 0 = f(m,\,n)$. Jos mn on pariton, on suorakaiteessa mustia ruutuja yksi enemmän kuin valkoisia. Tässä tapauksessa $|S_1 - S_2| = \frac{1}{2}$.

(b) Oletetaan, että n on pariton, m parillinen. Kolmiossa, jonka kärjet ovat $(0, 0)$, $(m, 0)$ ja $(m, n-1)$ on valkoisen ja mustan osan ala sama (tämä pätee myös, kun $n = 1$). Mustan tai valkean ylimäärä sisältyy siten kokonaan kolmioon, jonka kärjet ovat $(0, 0)$, $(m, n-1)$ ja (m, n). Tämän kolmion ala on $\frac{1}{2}m \le \frac{1}{2}\max(m, n)$.

(c) Arvioidaan itseisarvoa $|S_1 - S_2|$ tapauksessa, jossa m on parillinen ja $n = m + 1$. Aikaisemman perusteella tiedetään, että $|S_1 - S_2|$ on sama kuin mustan ja valkean alan erotus kolmiossa T, jonka kärjet ovat $(0, 0)$, (m, m) ja $(m, m+1)$. Suora $y = \frac{m+1}{m}x$ leikkaa suorat $x = k$ ja $y = k$ pisteissä $x = \frac{(m+1)k}{m}$ ja $y = \frac{mk}{m+1}$. Tämän perusteella on helppo laskea, että suorien $x = k$ ja $x = k + 1$ väliin jäävän T:n valkean osan ala on

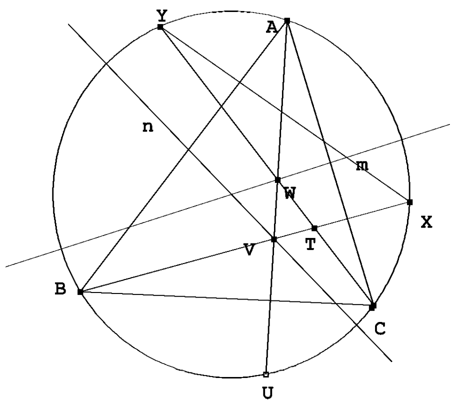
$$\frac{1}{2}\left(k - \frac{mk}{m+1}\right)\left(\frac{(m+1)k}{m} - k\right) = \frac{k^2}{2m(m+1)}.$$

T:n valkean osan kokonaisala on siis

$$\frac{1}{2m(m+1)}\sum_{k=1}^{m} k^2 = \frac{2m+1}{12} < \frac{m}{6}$$

(koska $\sum_{k=1}^{m} k^2 = \frac{m(m+1)(2m+1)}{6}$). Mustaa alaa on siis oltava enemmän kuin $\frac{m}{3}$, joten mustan ja valkean alan erotus on suurempi kuin $\frac{m}{6}$. Tämä on suurempi kuin mikä hyvänsä C, kun m on tarpeeksi suuri.

K 1997.2. Koska A on ABC:n kulmista pienin, AC:n keskinormaali leikkaa myös sivun AB ja AB:n keskinormaali sivun AC. Tästä seuraa, että pisteet V ja W ovat kolmion ABC sisäpisteitä ja T samoin. Leikatkoon suora BT kolmion ABC ympäri piirretyn ympyrän myös pisteessä X ja suora CT pisteessä Y. Koska AC:n keskinormaali n on ympyrän halkaisija, peilaus n:ssä vie janan AU janaksi CY (A peilautuu C:ksi, W pysyy paikallaan, ja U:n kuva on CW:n ja ympyrän leikkauspiste, siis Y. Siis $AU = YC$. Samoin osoitetaan (peilataan AB:n keskinormaalissa m), että $AU = BX$. Tästä seuraa, että kolmiot BCX ja YXC ovat yhtenevät (yhteinen sivu XC ja $\angle CBX = \angle XYC$). Siis $XY = BC$. Edelleen kolmiot BCT ja YXT ovat yhtenevät (kks). Siis $YT = BT$ ja $AU = YC = YT + TC = BT + TC$.



K 1997.3. Olkoon $p = (y_1, y_2, \ldots, y_n)$ mielivaltainen jonon $p_0 = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ permutaatio. Merkitään $s(p) = y_1 + 2y_2 + \cdots + ny_n$. Jos p' on se p_0:n permutaatio, jossa alkiot ovat täsmälleen käänteisessä järjestyksessä, niin $|s(p_0) + s(p')| = |(x_1 + 2x_2 + \cdots + nx_n) + (x_n + 2x_{n-1} + \cdots + nx_1)| = (n+1)|x_1 + x_2 + \cdots + x_n| = n + 1$. Jos jompikumpi luvuista $|s(p_0)|$, $|s(p')|$ on $\le \dfrac{n+1}{2}$, tehtävä on ratkaistu. Ellei näin ole, $s(p_0)$ ja $s(p')$ ovat erimerkkiset. Permutaatio p_0 voidaan muuntaa permutaatioksi p' tekemällä ketju peräkkäisiä muunnoksia, joissa kahden vierekkäisen alkion paikka vaihdetaan: vaihdetaan esim. ensin x_1 ja x_2, sitten x_1 ja x_3, jne., kunnes x_1:n ja x_n:n vaihdon jälkeen x_1 on viimeisenä, siirretään sitten x_2 samalla menetelmällä toiseksi viimeiseksi jne. Jos $p_i = (y_1,\, y_2,\, \ldots,\, y_n)$ ja $p_{i+1} = (z_1,\, z_2,\, \ldots,\, z_n)$ ovat permutaatioita, joissa $y_k = z_{k+1}$, $y_{k+1} = z_k$ ja $y_j = z_j$, kun $j \ne k,\, k+1$, niin $|s(p_i) - s(p_{i+1})| = |ky_k + (k+1)y_{k+1} - kz_k - (k+1)z_{k+1}| = |y_{k+1} - y_k| \le |y_k| + |y_{k+1}| \le n+1$. Jos nyt $p_0,\, p_1,\, \ldots,\, p_m = p'$ on ketju permutaatioita, jossa kaksi peräkkäistä saadaan toisistaan kahden vierekkäisen alkion vaihdolla, niin luvut $s(p_0)$, $s(p_1)$, $\ldots$, $s(p_m)$ eroavat toisistaan kukin enintään määrällä $n+1$, mutta $s(p_0)$ ja $s(p_m)$ ovat suljetun välin $I = \left[-\dfrac{n+1}{2},\, \dfrac{n+1}{2}\right]$ eri puolilla sijaitsevia lukuja. Ainakin jonkin luvuista $s(p_i)$ on siten kuuluttava väliin I.

K 1997.4. (a) Olkoon $n > 1$ mielivaltainen ja olkoon $A = (a_{ij})$ $n \times n$-hopeamatriisi. A:n päälävistäjällä on enintään n eri alkiota, joten on olemassa $x \in S$, joka ei ole A:n päälävistäjällä. Sanomme i:nnen vaaka- ja i:nnen pystyrivin yhdistettä *ristiksi* i. Olkoon $x = a_{ij}$. Sanomme, että x *liittää* ristin i ja ristin j. Koska x esiintyy jokaisessa ristissä vain kerran, x ei voi liittää ristiä i mihinkään muuhun ristiin. Toisaalta x liittää jokaisen ristin johonkin toiseen. Tästä seuraa, että ristien määrä hopeamatriisissa on aina parillinen; 1997 puolestaan on pariton.

(b) Matriisi

$$A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 1 \end{pmatrix}$$

on 2×2-hopeamatriisi. Olkoon A_n $n \times n$-hopeamatriisi. Olkoon B_n matriisi, joka saadaan lisäämällä $2n$ jokaiseen A:n alkioon, ja olkoon C_n matriisi, joka saadaan B_n:stä korvaamalla jokainen B_n:n päälävistäjän alkio luvulla $2n$. Tällöin

$$A_{2n} = \begin{pmatrix} A_n & B_n \\ C_n & A_n \end{pmatrix}$$

on $2n \times 2n$-hopeamatriisi. Jos nimittäin $i \le n$, niin A_{2n}:n ristissä i ovat ensinnäkin kaikki luvut $1,\, 2,\, \ldots 2n-1$ (A_n:n osuus); $1+2n,\, 2+2n,\, \ldots,\, 2n-1+2n = 2(2n)-1$ (B_n:n ja C_n:n alkiot, jotka ovat muotoa A_n:n alkio $+\ 2n$) sekä $2n$ (C_n:n lävistäjäalkio). Näin ollen $n \times n$ hopeamatriiseja on olemassa ainakin kaikilla $n = 2^k$, $k = 1,\, 2,\, \ldots$ [Hopeamatriisinimityksen innoittajina olivat Argentiina ja Mar del Plata: hopea on latinaksi *argentum* ja espanjaksi *plata*]

K 1997.5. Olkoot a ja b tehtävän yhtälön toteuttavia kokonaislukuja. Luvuilla a ja b on samat alkutekijät: $a = p_1^{\alpha_1} p_2^{\alpha_2} \cdots p_n^{\alpha_n}$, $b = p_1^{\beta_1} p_2^{\beta_2} \cdots p_n^{\beta_n}$, α_i, $\beta_i \ge 1$. Koska yhtälön molempien puolien alkutekijöihin jako on sama, on oltava $\alpha_i b^2 = \beta_i a$ kaikilla i. Siis

$$\frac{\alpha_i}{\beta_i} = \frac{a}{b^2} = k$$

kaikilla i. Tästä seuraa, että $a = b^k$ ja edelleen $kb^2 = b^k$ ja $k = b^{k-2}$. Koska a ja b ovat kokonaislukuja, k on rationaaliluku. Kokonaisluvun ratonaalilukueksponenttinen potenssi on rationaalinen vain, kun eksponentti on kokonaisluku. Siis k on kokonaisluku. Jos $k = 1$, niin $b = 1$ ja $a = 1$. Jos $k = 2$, saadaan $2 = b^0 = 1$. Siis $k \neq 2$. Jos $k = 3$, saadaan $3 = b^1 = b$, $a^9 = 3^a$, josta $a = 3^3 = 27$. Jos $k = 4$, saadaan $4 = b^2$, $b = 2$, $a^4 = 4^a$, $a = 2^4 = 16$. Kun $k \geq 5$, yhtälöllä $k = b^{k-2}$ ei ole ratkaisuja, koska $k < 2^{k-2}$, kun $k \geq 5$.

K 1997.6. Havaitaan helposti, että $f(2n) = f(2n+1)$, koska

$$2n = \sum a_i 2^{b_i} \Leftrightarrow 2n + 1 = \sum a_i 2^{b_i} + 1.$$

Vastaavasti jokainen $2n$:n esitys joko sisältää ykkösiä, ja tällaisia esityksiä on täsmälleen yhtä paljon kuin $2n-1$:n esityksiä, tai sitten se ei sisällä yhtään ykköstä, jolloin kahdella jakamalla saadaan aina n:n esitys ja kääntäen. Siis $f(2n) = f(2n-1) + f(n) = f(2n-2) + f(n)$. Selvästi $f(1) = 1$. Määritellään $f(0) = 1$. f on ei-vähenevä. Nyt $f(0) + f(1) + \ldots f(n) = f(0) + (f(2) - f(0)) + \ldots + (f(2n) - f(2n-2)) = f(2n)$, joten $f(2n) < 2 + (n-1)f(n) < nf(n)$, kun $n \geq 2$. Siis $f(2^n) \leq 2^{n-1} f(2^{n-1}) \leq 2^{n-1} \cdot 2^{n-2} f(2^{n-2}) \leq 2^{(n-1)+(n-2)+\ldots+1} f(2) = 2^{(n-1)n/2} \cdot 2 < 2^{n^2/2}$, kun $n \geq 3$.

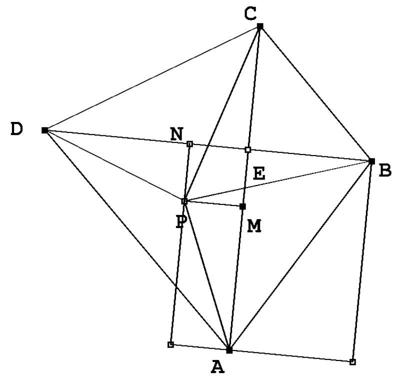
Vasemmanpuoleisen epäyhtälön todistamiseksi havaitaan, että kun a ja b ovat joko molemmat parillisia tai molemmat parittomia ja $b \geq a$, niin

$$f(b+1) - f(b) \geq f(a+1) - f(a). \tag{1}$$

Näin on varmasti, jos a ja b ovat parillisia; jos ne ovat parittomia, $b = 2j-1$, $a = 2i-1$, $j \geq i$, niin vasen puoli on $f(j)$ ja oikea $f(i)$, ja väite seuraa f:n kasvavuudesta. Olkoot nyt $r \geq k \geq 1$ ja r parillinen; sijoitetaan kaavaan (1) peräkkäin $a = r-j$, $b = r+j$, $j = 0, 1, \ldots, k-1$ ja lasketaan epäyhtälöt puolittain yhteen; saadaan $f(r+k) - f(r) \geq f(r+1) - f(r-k+1)$ ja (koska r on parillinen) $f(r+k) + f(r-k+1) \geq 2f(r)$ kaikilla $k = 1, 2, \ldots, r$. Kun nämä r epäyhtälöä lasketaan yhteen, saadaan $f(1) + f(2) + \ldots + f(2r) \geq 2rf(r)$ eli $f(4r) - 1 \geq 2rf(r)$, $f(4r) > 2rf(r)$ kaikilla parillisilla $r \geq 2$.Erityisesti $f(2^m) \geq 2^{m-1} f(2^{m-2})$, kun $m \geq 3$. Jos m on parillinen, saadaan $f(2^m) > 2^{(m-1)+(m-3)+\ldots+1} f(1) = 2^{m^2/4}$. Jos m on pariton, saadaan vastaavasti $f(2^n) > 2^{(n^2-1)/4} f(2) = 2^{(n^2-1)/4+1} > 2^{n^2/4}$.

K 1998.1. Olkoon E AC:n ja BD:n leikkauspiste ja M, N P:n projektiot AC:llä ja BD:llä. Kolmion APB ala on

$$AE \cdot BN - \frac{1}{2}(AE \cdot EB + AM \cdot EN + ME \cdot NB) = \frac{1}{2}(AM \cdot BN + EM \cdot EN).$$



Samoin saadaan kolmion CPD alaksi $\frac{1}{2}(MC \cdot ND + EM \cdot EN)$. Kolmioiden alojen erotus on $\frac{1}{2}(AM \cdot BN - MC \cdot ND)$. Oletetaan, että $ABCD$ on jännenelikulmio. Silloin piste P on $ABCD$:n ympäri piirretyn ympyrän keskipiste ja pisteet M ja N ovat jänteiden AC ja BD keskipisteet. Edellä laskettu kolmioiden alojen erotus on 0. Oletetaan toisaalta, että kolmioiden alat ovat yhtä suuret eli että $AM \cdot BN = MC \cdot ND$. Oletetaan, että $AP > PC$. Silloin $AM > MC$, ja koska $PB > PD$, niin myös $BN > ND$. Mutta nyt olisi $AM \cdot BN > MC \cdot ND$. Vastaavasti oletus $AP < PC$ johtaa ristiriitaan. Siis $AP = PC$, eli nelikulmion kaikki kärjet ovat yhtä etäällä pisteestä P, joten $ABCD$ on jännenelikulmio.

K 1998.2. Lasketaan kahdella tavalla sellaisten tilanteiden lukumäärä, joissa kaksi tuomaria antaa jollekin kilpailijalle saman arvostelun. Jos kilpailija saa x hyväksyntää ja $b-x$ hylkäystä, pareja, joilta hän saa saman arvostelun, on

$$\binom{x}{2} + \binom{b-x}{2} = \frac{x(x-1)+(b-x)(b-x-1)}{2} = x(x-b) + \frac{b^2-b}{2} \geq \frac{b^2-b}{2} - \frac{b^2-1}{4}$$
$$= \frac{(b-1)^2}{4}$$

kappaletta (x voi olla vain kokonaisluku, joten lauseke minimoituu, kun $x = \frac{b}{2} \pm \frac{1}{2}$). Jonkin tuomariparin johonkin kilpailijaan kohdistamia samanlaisia arvosteluja on siis ainakin

$$\frac{a(b-1)^2}{4}$$

kappaletta. Toisaalta tämä luku ei voi ylittää tuomariparien määrää $\binom{b}{2}$ kerrottuna k:lla. Siis

$$k\frac{b}{2} = \frac{kb(b-1)}{2} \geq \frac{a(b-1)^2}{4},$$

mikä on yhtäpitävää väitöksen kanssa.

K 1998.3. Jos $n = p_1^{k_1} p_2^{k_2} \cdots p_j^{k_j}$, missä $p_1 < p_2 < \ldots < p_j$ ovat alkulukuja, niin $d(n) = (k_1+1)(k_2+1)\cdots(k_j+1)$ ja $d(n^2) = (2k_1+1)(2k_2+1)\cdots(2k_j+1)$. Jos $d(n^2)/d(n) = k$ on kokonaisluku, niin k on välttämättä pariton. Osoitetaan, että jokaisella parittomalla k:lla on esitys $\frac{d(n^2)}{d(n)}$. Koska $d(1) = d(1^2) = 1$, luvulla 1 on tämä ominaisuus. Osoitetaan että jos luvulla x on esitys $d(n^2)/d(n)$, niin jokaisella luvulla 2^kx-1 on tällainen esitys. Olkoon

$$\frac{d(n^2)}{d(n)} = x.$$

Olkoon p alkuluku, joka ei ole n:n tekijä. Silloin

$$\frac{d(p^{(x-1)2}n^2)}{d(p^{x-1}n)} = \frac{(2x-1)x}{x} = 2x-1.$$

Väite on tosi, kun $k=1$. Jos $k>1$, valitaan

$$m = p_1^{2^{k-1}3x-2}p_2^{2^{k-2}3^2}\cdots p_{k-1}^{2\cdot 3^{k-1}x-2}p_k^{3^{k-1}x-1}n,$$

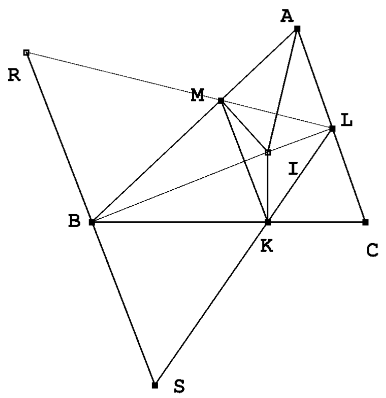
missä p_1, p_2 ..., p_n ovat eri alkulukuja, jotka eivät ole n:n tekijöitä. Tällöin

$$\frac{d(m^2)}{d(m)} = \frac{2^k3x-3}{2^{k-1}3x-1}\frac{2^{k-1}3^2x-3}{2^{k-2}3^2x-1}\cdots\frac{2^23^{k-1}x-3}{2\cdot 3^{k-1}x-1}\frac{2\cdot 3^{k-1}x-1}{3^{k-1}x}x = 2^kx-1.$$

Nyt on helppo todistaa induktiolla, että jokaisella parittomalla luvulla on haluttu esitys. Jos se on kaikilla parittomilla luvuilla $< n$, niin kirjoitetaan $n = 2^kx-1$, missä $x<n$ on pariton luku; väite seuraa edellä sanotusta.

K 1998.4. Jos ab^2+b+7 on luvun a^2b+a+b tekijä, niin se on myös luvun $b(a^2b+a+b)-a(ab^2+b+7) = b^2-7a$ tekijä. Koska $ab^2+b+7 \geq b^2-7a$, niin $ab^2+b+7|b^2-7a$ vain, jos $b^2-7a \leq 0$. Jaollisuus on voimassa, jos $b^2-7a=0$. Koska a ja b ovat kokonaislukuja, on oltava $b=7k$, $a=7k^2$. Tämä on ratkaisu jokaisella $k\in\mathbb{N}^+$. Jos $b^2-7a<0$, ab^2+b+7 on tekijä positiivisessa luvussa $7a-b^2 \leq 7a$. Selvästikin tämä voi olla mahdollista vain, jos $b=1$ tai jos $b=2$. Tapaus $b=1$: $a+8|7a-1$. Koska $7a-1 = 7(a+8)-57$, on luvun $a+8$ oltava jokin 57:n tekijä. Koska $57 = 3\cdot 19$, luvut $a=49$ ja $a=11$ ovat mahdollisia; ne myös toteuttavat tehtävän ehdon. Tapaus $b=2$: $4a+9|7a-4$; nyt $4(7a-4) = 7(4a+9)-79$. Alkuluku 79 ei ole muotoa $4a+9$, joten tässä tapauksessa ei saada ratkaisuja.

K 1998.5. Olkoot kolmion ABC kulmat 2α, 2β ja 2γ. Tarkastellaan kolmion MRB kulmia. Jänneneli-kulmiosta $AMIL$ nähdään, että $\angle LMI = \alpha$. Tästä seuraa, että $\angle RMB = 90^\circ - \alpha$. Vastaavasti nähdään, että $\angle RBM = 90^\circ - \beta$, joten $\angle MRB = 90^\circ - \gamma$. Edelleen $\angle RBI$ on suora. Sinilauseen nojalla



$$BR = \frac{\cos\alpha}{\cos\gamma}MB.$$

Symmetrian vuoksi kolmiosta BKS saadaan samoin

$$BS = \frac{\cos\gamma}{\cos\alpha}KB = \frac{\cos\gamma}{\cos\alpha}MB.$$

Käytetään nyt Pythagoraan lausetta suorakulmaisiin kolmioihin IBR ja IBS ja kosinilausetta kolmioon RSI:

$$\begin{aligned}2\cos(\angle RIS)\cdot IR\cdot IS &= IR^2+IS^2-RS^2\\ &=(BI^2+BR^2)+(BI^2+BS^2)-(BR+BS)^2=2BI^2-2BM^2.\end{aligned}$$

Koska BIM on suorakulmainen kolmio, viimeinen erotus on $2\cdot MI^2$ ja siis positiivinen. Siis kulman RIS kosini on positiivinen, joten kulma on terävä.

K 1998.6. Olkoon $f(1)=a$. Silloin $f(f(s))=f(1^2f(s))=sf(1)^2=a^2s$ ja $f(at^2)=f(t^2f(1))=f(t)^2$. Edelleen $(f(s)f(t))^2=f(s)^2f(at^2)=f(s^2f(f(at^2)))=f(s^2a^2(at^2))=f(a(ats)^2)=f(ast)^2$. Siis $f(s)f(t)=f(ast)$ ja edelleen $af(t)=f(at)$, $af(st)=f(ast)=f(s)f(t)$. Tästä seuraa induktiolla, että $f(s)^k=a^{k-1}f(s^k)$. Osoitetaan, että $a|f(s)$. Jos p on alkuluku ja α suurin kokonaisluku, jolla $p^\alpha|a$, β suurin kokonaisluku, jolla $p^\beta|f(s)$, niin $p^{(k-1)\alpha}$ on suurin p:n potenssi, joka on a^{k-1}:n tekijä ja $p^{k\beta}$ suurin p:n potenssi, joka on $f(s)^k$:n tekijä. Siis $(k-1)\alpha\le k\beta$. Tämä epäyhtälö toteutuu kaikilla k, joten on oltava $\alpha\le\beta$. Olkoon nyt $g(s)=\dfrac{1}{a}f(s)$. Silloin $g(a)=\dfrac{1}{a}f(f(1))=\dfrac{a^2}{a}=a$, $a^2g(st)=af(st)=f(s)f(t)=a^2g(s)g(t)$ eli $g(st)=g(s)g(t)$. Lisäksi $a^2g(g(s))=ag(a)g(g(s))=ag(ag(s))=ag(f(s))=f(f(s))=a^2s$. Siis $g(g(s))=s$. Siis $g(t^2g(s))=g(t^2)g(g(s))=sg(t)^2$. Siis g toteuttaa saman funktionaaliyhtälön kuin f; $f(1998)$:n pienintä arvoa etsittäessä voitaan näin ollen rajoittua funktioihin f, joille $f(1)=1$, ts. tyyppiä g oleviin funktioihin. Osoitetaan, että $g(p)$ on alkuluku, jos p on alkuluku. Olkoon $g(p)=uv$. Silloin $g(u)g(v)=g(uv)=g(g(p))=p$, joten esimerkiksi $g(v)=1$. Mutta $v=g(g(v))=g(1)=1$. Tämä on mahdollista kaikille $g(p)$:n tekijöihin jaoille vain, jos $g(p)$ on alkuluku. g:n multiplikatiivisuuden perusteella $g(p_1^{\alpha_1}p_2^{\alpha_2}\cdots p_k^{\alpha_k})=g(p_1^{\alpha_1})g(p_2^{\alpha_2})\cdots g(p_k^{\alpha_k})$. Ehdon $g(g(s))=s$ nojalla g on injektio ja saa siis eri alkuluvuilla eri arvot. Siis $g(1998)=g(2\cdot3^3\cdot37)=g(2)g(3)^3g(37)$ on mahdollisimman pieni, kun $g(3)=2$, $g(2)=5$ ja $g(37)=3$; tällöin $g(1998)=120$. Toisaalta voidaan määritellä ehdot toteuttava g asettamalla $g(2)=5$, $g(3)=2$, $g(37)=3$, $g(5)=37$ ja $g(p)=p$, jos p on alkuluku, joka ei ole 2, 3, 5 eikä 37. Kysytty pienin arvo on siis 120.

K 1999.1. Olkoon S tehtävän ehdon täyttävä joukko ja monikulmio $S'=A_1A_2\ldots A_n$ pienin S:n sisältävä kupera joukko. Monikulmion kärjet ovat S:n pisteitä. Jos l on S:n symmetria-akseli, l on myös S':n symmetria-akseli, ja jokainen peilaus, jossa S kuvautuu itselleen, kuvaa myös S':n itselleen.. Oletetaan, että jokin S:n piste B olisi S':n sisällä. Silloin peilaus, jossa $A_1\mapsto B$ ei kuvaisi S':a itselleen. Siis $S'=S$. Mitkään kolme S:n pistettä eivät ole samalla suoralla. Jos X, Y ja Z olisivat kolme tällaista pistettä ja l ja m janojen XY ja YZ keskinormaalit, niin peilaukset P_l ja P_m suorien l ja m yli kuvaisivat S:n itselleen. Toisaalta yhdistetty kuvaus $P_m\circ P_l$ on translaatio, jossa $X\mapsto Z$. Mutta joukko, joka kuvautuu translaatiossa itselleen, ei voi olla äärellinen. Peilaus, jossa $A_1\mapsto A_3$ pitää välttämättä pisteen A_2 paikallaan. Mutta tästä seuraa, että $A_1A_2=A_2A_3$, ja symmetrian nojalla kaikki monikulmion sivut ovat yhtä pitkiä. Olkoon nyt $n\ge4$. Peilaus, jossa $A_1\mapsto A_4$ kuvaa A_2:n A_3:lle. Mutta välttämättä $\angle A_1A_2A_3=\angle A_2A_3A_4$. Siis S on säännöllinen n-kulmio. – On selvää, että jokainen säännöllinen n-kulmio toteuttaa tehtävän ehdon.

K 1999.2. Merkitään

$$S = x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2,$$
$$T = x_1 + x_2 + \cdots + x_n.$$

Silloin yksinkertaisen arvion ja aritmeettis-geometrisen epäyhtälön perusteella saadaan

$$\sum_{1\le i<j\le n} x_i x_j (x_i^2 + x_j^2) \le \sum_{1\le i<j\le n} x_i x_j S = \frac{1}{2} S \cdot 2 \sum_{i<j} x_i x_j \le \frac{1}{2}\left(\frac{S + 2\sum_{i<j} x_i x_j}{2}\right)^2 = \frac{T^4}{8}.$$

(*Kiinan olympiajoukkueen jäsenen Ruochuan Liun ratkaisu.*)

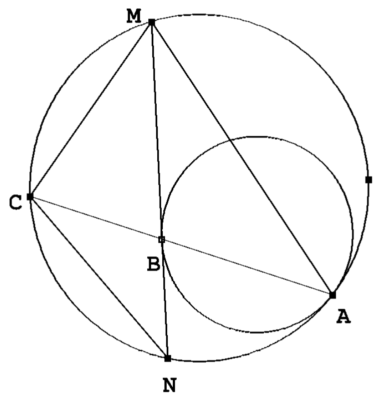
K 1999.3. Olkoon $n = 2k$. Reunaan rajoittuvat $4(n-1)$ ruutua olkoot valkoisia, näihin rajoittuvat $4(n-3)$ ruutua mustia, seuraavat $4(n-5)$ valkoisia jne. Valkoisten ruutujen määrä on joko $4(n-1+n-5+\cdots+1) = 4\frac{n}{2}\frac{n+2}{4} = 2k(k+1)$ (jos k on pariton) tai $4(n-1+n-5+\cdots+3) = 4\frac{n+2}{2}\frac{n}{4} = 2k(k+1)$ (jos k on parillinen. Koska jokaisella ruudulla on naapurina tasan kaksi valkoista ruutua, on merkittävä ainakin $k(k+1)$ ruutua, jotta jokaisella valkoisella ruudulla olisi merkitty naapuri. Merkittävien ruutujen määrä on siis ainakin $k(k+1)$. Aletaan nyt merkitä valkoisia ruutuja siten, että jokaisen valkoisen renkaan vasemman yläkulman kaksi vierekkäistä ruutu merkitään, seuraavat kaksi jätetään merkitsemättä, seuraavat kaksi merkitään jne. Näin jokainen valkoinen ruutu on merkityn ruudun vieressä. Mutta myös jokainen musta ruutu on merkityn ruudun vieressä: mustan renkaan vasen yläkulma on ulkopuolisen valkean renkaan toisen merkityn ruudun vieressä, myötäpäivään seuraavat kaksi sisäpuolisen valkean renkaan kahden ensimmäisen merkityn ruudun vieressä jne. (*Australian olympiajoukkueen jäsenen George Chun ratkaisu.*)

K 1999.4. Parit $(1, p)$ ja $(2, 2)$ toteuttavat tehtävän ehdon. Muissa ratkaisuissa on oltava $p \ge 3$. Koska $(p-1)^n + 1$ on pariton, n on pariton ja siis $n < 2p$. Olkoon q n:n pienin alkutekijä. q on pariton. Koska $q|(p-1)^n$, niin $(p-1)^n \equiv -1 \mod q$. Toisaalta n:llä ja $q-1$:llä ei ole yhteisiä tekijöitä, joten on olemassa kokonaisluvut x ja y, joille $xn + y(q-1) = 1$. Siis $p - 1 \equiv (p-1)^{xn} \cdot (p-1)^{y(q-1)} \mod q$. Mutta yllä olevan perusteella tulon edellinen tekijä on kongruentti $(-1)^k$:n ja Fermat'n pienen lauseen nojalla jälkimmäinen puolestaan kongruentti 1:n kanssa. Koska q on pariton, k on pariton. Siis $p - 1 \equiv -1 \mod q$. Mutta tämä merkitsee, että p on jaollinen q:lla, joten $p = q$. Edelleen $p|n$, ja koska $n < 2p$, $n = p$. Luku p toteuttaa näin ollen ehdon $p^{p-1}|(p-1)^p + 1$. Mutta

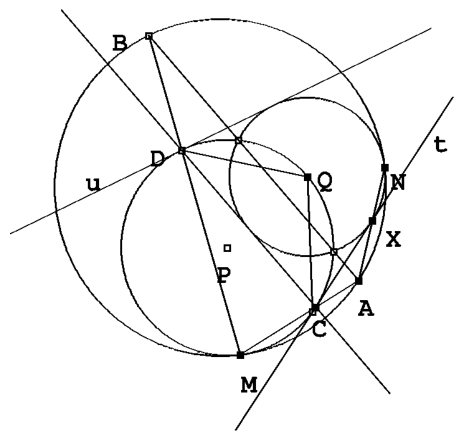
$$(p-1)^p + 1 = \sum_{j=0}^{p-1} \binom{p}{j} (-1)^j p^{p-j} = p^2 \left(\sum_{j=0}^{p-2} \binom{p}{j} (-1)^j p^{p-j-2} + 1 \right).$$

Koska sulkulauseke ei ole jaollinen p:llä, $p - 1 \le 2$ eli $p \le 3$. $n = p = 3$ toteuttaa ehdon. Ratkaisuja ovat siis parit $(2, 2)$, $(3, 3)$ ja $(1, p)$, p alkuluku.

K 1999.5. Todistetaan ensin aputulos: Jos y on ympyrä, y_1 toinen ympyrä, joka sivuaa y:tä sisäpuolisesti pisteessä A, NM y:n jänne, joka sivuaa y_1:tä pisteessä B ja C sen y:n kaaren keskipiste, joka ei sisällä A:ta, niin A, B ja C ovat samalla suoralla ja $CA \cdot CB = CM^2$. Todistus perustuu A-keskiseen homotetiaan, joka vie y_1:n y:ksi ja NM:n NM:n suuntaiseksi y:n tangentiksi; tämän tangentin sivuamispiste on C, joten C on B:n kuva A-keskisessä homotetiassa. Koska C on kaaren MN keskipiste, kulmat $\angle CMB = \angle CNM$ ja $\angle CAM$ ovat yhtä suuret. Siis kolmiot ACM ja MCB ovat yhdenmuotoiset, mistä seuraa $CA \cdot CB = CM^2$.



Olkoot nyt P ja Q Γ_1:n ja Γ_2:n keskipisteet ja t, u ympyröiden yhteiset tangentit. Aputuloksen perusteella tangenttien Γ:sta leikkaamien kaarien (joilla Γ:n ja Γ_1:n ja Γ_2:n sivuamispisteet eivät ole) keskipisteillä on sama potenssi Γ_1:n ja Γ_2:n suhteen. Pisteet, joilla on sama potenssi kahden toisiaan leikkaavan ympyrän suhteen ovat ympyröiden leikkauspisteiden kautta kulkevan suoran (eli ympyröiden *radikaaliakselin*) pisteet. Tästä seuraa, että mainitut kaarien keskipisteet ovat A ja B. Aputuloksen perusteella edelleen C ja D ovat Γ_1:n ja t:n sekä u:n sivuamispisteet. Jos H on M-keskinen homotetia, joka kuvaa Γ_1:n Γ:ksi, niin CD kuvautuu H:ssa AB:ksi. Siis $AB \| CD$, $CD \perp PQ$ ja Q on Γ_1:n kaaren CD keskipiste. Olkoon X t:n ja Γ_2:n sivuamispiste. Silloin $\angle XCQ = \angle DCQ$. Q on siis kulman XCD puolittajalla. Mutta tästä seuraa, että CD on Γ_2:n tangentti.



K 1999.6. Olkoon A $\mathbb{R}$:n kuva kuvauksessa f. Olkoon $a = f(0)$. Siis

$$f(-a) = f(a) + a - 1.$$

Tästä nähdään, että $c \neq 0$. Jos $x = f(y)$, niin

$$a = f(0) = f(x) + x^2 + f(x) - 1,$$

joten

$$f(x) = \frac{1+a}{2} - \frac{1}{2}x^2$$

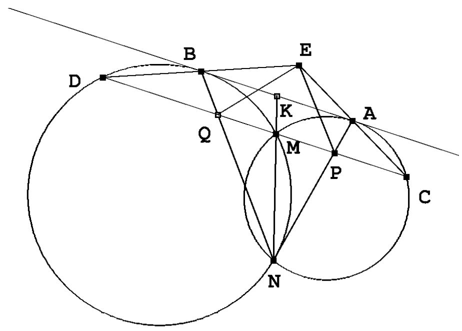
kaikilla $x \in A$. Osoitetaan, että jokainen reaaliluku voidaan kirjoittaa kahden A:han kuuluvan luvun erotuksena: jos tehtävän ehtoon asetetaan $y = 0$, saadaan

$$f(x-a) - f(x) = f(a) + ax - 1.$$

Koska $a \neq 0$, lukujen $f(x-a)-f(x)$ joukko on koko reaalilukujen joukko. Jokaisella $x \in \mathbb{R}$ on siis luvut y_1, $y_2 \in A$ siten, että $x = y_2 - y_1$. Alkuperäisen ehdon perusteella

$$f(x) = f(y_2 - y_1) = f(y_1) + y_1y_2 + f(y_2) - 1$$
$$= \frac{1}{2}(1+a) - \frac{y_1^2}{2} + y_1y_2 + \frac{1}{2}(1+a) - \frac{y_2^2}{2} - 1 = a - \frac{(y_2-y_1)^2}{2} = a - \frac{x^2}{2}.$$

On oltava $\frac{1}{2}(a+1) = a$ eli $a = 1$. Ainoa mahdollinen funktio on siis $f(x) = 1 - \frac{1}{2}x^2$. – On helppo tarkistaa, että se myös on ratkaisu.



K 2000.1. Olkoon K suorien AB ja MN leikkauspiste. Lasketaan K:n potenssi molempien ympyröiden suhteen: $AK^2 = KM \cdot KN = BK^2$. Siis $AK = BK$. Koska $PQ \| AB$, on myös M janan PQ keskipiste. Väitteen todistamiseksi riittää näyttää, että $EM \perp PQ$. Mutta $\angle EAB = \angle ECM = \angle BAM$ ja $\angle EBA = \angle EDM = \angle ABM$. Suorat AE ja BE ovat suorien AM ja BM peilikuvia suorassa AB, joten E ja M ovat toistensa peilikuvia. Siis $EM \perp AB$, joten $EM \perp PQ$.

K 2000.2. Koska $abc = 1$, voidaan valita positiiviset reaaliluvut x, y ja z niin, että

$$a = \frac{x}{y}, \quad b = \frac{y}{z} \quad \text{ja} \quad c = \frac{z}{x}.$$

Epäyhtälö saa muodon

$$(x-y+z)(y-z+x)(z-x+y) \leq xyz.$$

Vasemman puolen kolmesta tekijästä enintään yksi on negatiivinen, koska jokaisen kahden summa on positiivinen. Jos yksi tekijä on negatiivinen, epäyhtälö toteutuu. Jos kaikki tekijät ovat positiivisia, voidaan käyttää aritmeettis-geometrista epäyhtälöä:

$$\sqrt{(x-y+z)(x+y-z)} \leq \frac{1}{2}(x-y+z+x+y-z) = x$$
$$\sqrt{(x+y-z)(y+z-x)} \leq \frac{1}{2}(x+y-z+y+z-x) = y$$
$$\sqrt{(x-y+z)(z+y-x)} \leq \frac{1}{2}(x-y+z+z+y-x) = z$$

Kun nämä epäyhtälöt kerrotaan keskenään, saadaan väitetty epäyhtälö.

K 2000.3. Muodostetaan siirtymäjono niin, että äärimmäisenä vasemmalla oleva kirppu hyppää äärimmäisenä oikealla olevan kirpun yli. Olkoon D_k suurin kirppujen välinen etäisyys ja d_k pienin kirppujen välinen etäisyys k:n siirtymän jälkeen. Selvästi $D_k \geq (n-1)d_k$. $k+1$:nen siirto tuottaa kirppujen välisen etäisyyden $\lambda D_k \geq \lambda(n-1)d_k$, joka on samalla pienin hypänneen kirpun ja muiden kirppujen etäisyyksistä. Tästä seuraa, että $d_{k+1} \geq \min\{d_k, \lambda(n-1)d_k$. Jos $\lambda(n-1) \geq 1$, jokaisen siirron jälkeen vasemmanpuoleisin kirppu on siirtynyt ainakin d_0:n verran oikealle, joten äärellisen monen siirtymän jälkeen kaikki kirput ovat pisteen M oikealla puolella.

Olkoon sitten $\lambda < \dfrac{1}{n-1}$. Voidaan olettaa, että alussa vasemmanpuoleinen kirppu on origossa. Olkoon k:nnen siirtymän jälkeen kirppujen sijaintien summa s_k ja äärimmäisenä oikealla olevan kirpun sijainti w_k. Silloin $s_k \le nw_k$. Jos $k+1$:ssä siirtymässä kirppu siirtyy pisteestä, jonka koordinaatti on a pisteeseen, jonka koordinaatti on c ylittäen kirpun pisteessä B, jonka koordinaatti on b, niin $s_{k+1} = s_k - a + c$ ja $c - b = \lambda(b-a) = \lambda(b-c+c-a)$, joten $c - a = \dfrac{\lambda}{1+\lambda}(c-b)$. Siis

$$s_{k+1} - s_k = \frac{1+\lambda}{\lambda}(c-b).$$

Jos $w_{k+1} = c$, niin $b \le w_k$, joten

$$s_{k+1} - s_k \ge \frac{1+\lambda}{\lambda}(w_{k+1} - w_k).$$

Sama epäyhtälö on tosi myös, jos $c \le w_k$, koska tällöin oikea puoli on 0 ja vasen $c - a > 0$. Mutta tämä merkitsee, että

$$\frac{1+\lambda}{\lambda}w_k - s_k \ge \frac{1+\lambda}{\lambda}w_{k+1} - s_{k+1}$$

kaikilla k. Jokainen $\dfrac{1+\lambda}{\lambda}w_k - s_k$ on pienempi kuin jokin vakio G. Mutta koska $\lambda < \dfrac{1}{n-1}$, on $\dfrac{1+\lambda}{\lambda} > n$. Siis

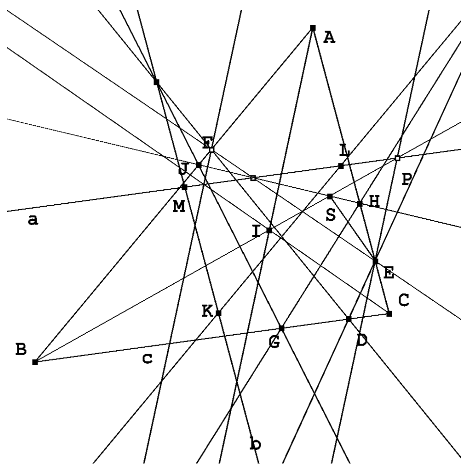
$$\left(\frac{1+\lambda}{\lambda} - n\right)w_k < \left(\frac{1+\lambda}{\lambda} - n\right)w_k + (nw_k - s_k) = \frac{1+\lambda}{\lambda}w_k - s_k \le G.$$

Mutta tämä merkitsee, että $\{w_k\}$ on rajoitettu jono; oli alkuasetelma mikä hyvänsä, oikeanpuoleisin kirppu ei pääse mielivaltaisen kauas.

K 2000.4. Oletetaan, että kolme peräkkäisnumeroista korttia i, $i+1$ ja $i+2$ ovat eri laatikoissa, esim. i punaisessa, $i+1$ valkoisessa ja $i+2$ sinisessä. Koska $i+(i+3) = (i+1)+(i+2)$ ja $(i-1)+(i+2) = i+(i+1)$ on i:nnen ja $i+3$:nnen kortin samoin kuin $i-1$:sen ja $i+2$:sen kortin oltava samoissa laatikoissa. Prosessia voidaan jatkaa kumpaankin suuntaan, ja päädytään siihen, että kortit 1, 2 ja 3 ovat erivärisissä laatikoissa; näiden korttien sijoitus määrää kaikki muut. Eri tapoja sijoittaa kortit 1, 2 ja 3 on 6. Oletetaan sitten, että ei ole kolmea peräkkäisnumeroista korttia, jotka olisi sijoitettu erivärisiin laatikkoihin. Olkoon esimerkiksi kortti 1 punaisessa laatikossa. Olkoon i pienin ei-punaisessa laatikossa oleva kortti. Oletetaan, että i on valkoisessa laatikossa. Olkoon vielä k pienin sinisessä laatikossa oleva kortti. Koska peräkkäisnumeroiset kortit eivät ole erivärisissä laatikoissa, on oltava $i+1 < k$. Koska $i+k = (i-1)+(k+1)$, kortin $k+1$ on oltava punaisessa laatikossa. Mutta $i+(k+1) = (i+1)+k$, joten kortin $i+1$ on oltava sinisessä laatikossa, mikä on ristiriidassa sen kanssa, että k on pienin sinisessä laatikossa oleva kortti. Ristiriita vältty vain, jos $k = 100$. Koska $(i-1)+100 = i+99$, 99 on valkoisessa laatikossa. Osoitetaan vielä, että jos $1 < t < 99$, niin t on valkoisessa laatikossa. Jos t olisi punaisessa, olisi $t + 99 = (t - 1) + 100$. Tämä merkitsee, että $t - 1$ olisi sinisessä laatikossa, mikä ei ole mahdollista, koska pienin sinisen laatikon kortti on 100. Sijoittelu, jossa 1 on punaisessa laatikossa, 100 sinisessä ja muut valkoisessa, toimii: jos summa on ≤ 100, korttia ei ole otettu sinisestä laatikosta, jos se on 101, ei valkoisesta, ja jos yli 101, ei punaisesta. – Eri tapoja yhdistää värit ja kortit on jälleen 6.

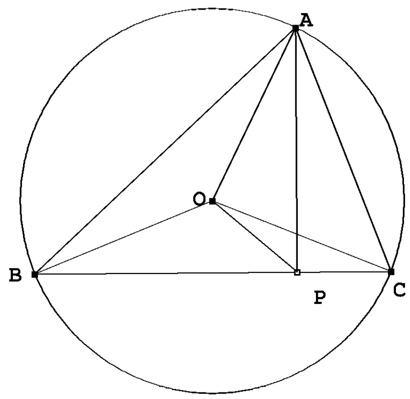
K 2000.5. Todistetaan yleisempi tulos: Jokaista positiivista kokonaislukua k kohden on olemassa positiivinen kokonaisluku $n = n(k)$ siten, että $2^n + 1$ on jaollinen n:llä, 3 on n:n tekijä ja n on jaollinen tasan k:lla ei alkuluvulla. Todistetaan väite induktiolla. Nojaudutaan seuraavaan aputulokseen, joka todistetaan ensin: Jokaista positiivista kokonaislukua $a > 2$ kohden on olemassa alkuluku p siten, että p on tekijänä $a^3 + 1$:ssä muttei $a + 1$:ssä. Oletetaan, että a on luku, jolle tämä ei päde. Koska $a^3 + 1 = (a+1)(a^2 - a + 1)$, jokainen luvun $a^2 - a + 1$ alkutekijä on $a + 1$:n tekijä. Koska $a^2 - a + 1 = (a+1)(a-2) + 3$, vain 3 voi olla $a^2 - a + 1$:n alkutekijä, joten $a^2 - a + 1$ on kolmen potenssi. Mutta $a + 1$ ja myös $a - 2 = a + 1 - 3$ ovat jaollisia 3:lla. Tästä seuraa, että $a^2 - a + 1$ on jaollinen 3:lla, muttei 9:llä. Siis $a^2 - a + 1 = 3$, mikä ei ole mahdollista, jos $a > 2$. Aputulos on todistettu. Siirrytään sitten varsinaiseen induktiotodistukseen. Jos $k = 1$, luvuksi $n = n(1)$ käy 3. Oletamme, että jollekin $k \geq 1$ on olemassa $n = n(k) = 3^q \cdot t$, $q \geq 1$ ja t jaoton kolmella, niin että $2^n + 1$ on jaollinen n:llä ja n:llä on k eri alkutekijää. Silloin n on pariton, mistä seuraa, että $2^{2n} - 2^n + 1 \equiv 1^n - (-1)^n + 1 \equiv 0 \bmod 3$. Koska $2^{3n} + 1 = (2^n + 1)(2^{2n} - 2^n + 1)$, $2^{3n} + 1$ on jaollinen luvulla $3n$. Aputuloksen mukaan on olemassa pariton kokonaisluku p, joka on tekijänä luvussa $2^{3n} + 1$ muttei luvussa $2^n + 1$. Luvulla $n(k+1) = 3pn(k)$ on $k + 1$ eri alkutekijää. $(2^{3n})^p + 1$ on jaollinen sekä $3n$:llä että p:llä, joten $n(k+1)$ on kelvollinen luku ja induktioaskel on otettu.

K 2000.6. Olkoot K, L ja M pisteiden G, H ja J kuvat peilauksissa kolmion ABC kulmien A, B ja C puolittajissa. Koska kulmanpuolittajat ovat sisään piirretyn ympyrän halkaisijoita, pisteet K, L ja M ovat ABC:n sisään piirretyllä ympyrällä. Osoitetaan, että suoran EF peilikuva a suoran HJ suhteen kulkee pisteen L kautta. Symmetrian nojalla tästä seuraa, että KLM on tehtävässä määrätty kolmio. Pisteet H ja E ovat samalla puolella suoraa BI, H lähempänä BI:tä kuin E. Oletetaan, että myös C on samalla puolella suoraa BI kuin nämä (todistus on muunnettavissa tapaukseen, jossa näin ei ole). Olkoot kolmion ABC kulmat 2α, 2β ja 2γ.



Osoitetaan, että pisteen E peilikuva suorassa HJ on suoralla BI. Olkoon ℓ suoran HJ normaali, joka kulkee pisteen E kautta. Olkoon P ℓ:n ja BI:n leikkauspiste ja olkoon S HJ:n ja BI:n leikkauspiste. Piste S on janalla BP ja janalla HJ. Osoitetaan, että $\angle PSE = 2\angle PSH$. Kolmion kulman vieruskulmalauseen nojalla ja koska $AI \perp HJ$, $\angle PSH = \angle BSJ = \angle AJS - \angle JBS = (90° - \alpha) - \beta = \gamma$. Koska G ja J ovat symmetrisiä suoran BI suhteen, $\angle BSG = \angle BSJ = \gamma$. Kulma $BGS = 90° + \alpha$, joten S ja C ovat samalla puolella suoraa GI. Koska $\angle ISG = \angle ICG$, $IGCS$ on jännenelikulmio. Tästä seuraa, että $\angle ISC = \angle IGC = 90^\circ$. Mutta tästä seuraa, että $BCES$ on jännenelikulmio. Siis $\angle PSE = 180^\circ - \angle BSE = \angle BCE = 2\gamma = 2\angle PSH$. Tästä seuraa, että P on suoralla a. Edellä suoritettu päättely osoittaa lisäksi, että $\angle BPH = \angle SEH = \beta$, koska P ja E ovat peilikuvia suoran HJ suhteen ja koska $BCES$ on jännenelikulmio. Koska L on H:n peilikuva BI:ssä, $\angle BPL = \angle BPH = \beta = \angle CBP$. Siis $PL \| BC$. Koska P on suoralla a, on todistettava, että $a \| BC$. Jos $\beta = \gamma$, näin on laita. Olkoon $\beta \neq \gamma$. Olkoot D ja E suoran BC ja suorien EF ja HJ leikkauspisteet. (D ja E ovat BC:llä samalla puolella C:tä.) Koska $\angle BCF = 90^\circ - 2\beta$ ja $\angle CBE = 90 - 2\gamma$ ja koska $\angle CFE = \angle CBE$ ($BCEF$ on jännenelikulmio), on $\angle BDF = 2\gamma - 2\beta$. Koska $\angle HJI = \alpha$ ja $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$, on $\angle BEJ = 180^\circ - 2\beta - 90^\circ - \alpha = \gamma - \beta$. Tästä seuraa, että suorien EF ja HJ välinen kulma on $\gamma - \beta$ ja a on BC:n suuntainen. Todistus on valmis.

K 2001.1. Olkoon $\angle CAB = \alpha$, $\angle ABC = \beta$, $\angle BCA = \gamma$ ja $AO = BO = CO = R$. Koska $\angle BOC = 2 \cdot \angle BAC = 180^\circ - 2 \cdot \angle OCP$, $\angle BAC + \angle OCP = 90^\circ$. Väite tulee todistetuksi, kun osoitetaan, että $\angle POC < \angle OCP$. Tätä varten riittää, että osoitetaan, että $PC < OP$. Suorakulmaisista kolmioista ABP ja ACP sekä sinilauseesta saadaan



$$\begin{aligned} BP - PC &= AB\cos\beta - AC\cos\gamma \\ &= 2R(\sin\gamma\cos\beta - \cos\gamma\sin\beta) = 2R\sin(\gamma - \beta). \end{aligned}$$

Mutta oletusten perusteella $30^\circ \leq \gamma - \beta < 90^\circ$, joten $BP - PC \geq R$ eli $R + PC \leq BP$. Kolmioepäyhtälön ja kolmion ABC teräväkulmaisuuden perusteella $BP < BO + OP = R + OP$, josta haluttu epäyhtälö $PC < OP$ seuraakin.

K 2001.2. Koska epäyhtälön vasen puoli on pysyy samana, jos (a, b, c) korvataan (ka, kb, kc):llä, voidaan olettaa, että $abc = 1$. On siis osoitettava, että

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \dfrac{8}{a^3}}} + \frac{1}{\sqrt{1 + \dfrac{8}{b^3}}} + \frac{1}{\sqrt{1 + \dfrac{8}{c^3}}} \geq 1.$$

On siis todistettava, että

$$\frac{1}{\sqrt{1+8x}} + \frac{1}{\sqrt{1+8y}} + \frac{1}{\sqrt{1+8z}} \geq 1,$$

kun $xyz = 1$. Tämä tulee todistetuksi, jos löydetään c siten, että

$$\frac{1}{\sqrt{1+8x}} \geq \frac{x^c}{x^c + y^c + z^c}, \qquad \frac{1}{\sqrt{1+8y}} \geq \frac{y^c}{x^c + y^c + z^c}, \qquad \frac{1}{\sqrt{1+8z}} \geq \frac{z^c}{x^c + y^c + z^c}.$$

Riittää, kun todistetaan epäyhtälöistä ensimmäinen. Mutta koska

$$y^c + z^c = \left(y^{c/2} - z^{c/2}\right)^2 + 2(yz)^{c/2} \geq \frac{2}{x^{c/2}},$$

riittää, kun löydetään c, jolle

$$\frac{1}{\sqrt{1+8x}} \geq \frac{x^c}{x^c+2x^{-c/2}} = \frac{1}{1+2x^{-3c/2}} = \frac{1}{1+2x^d}$$

eli $1+8x \leq (1+2x^d)^2$. Tämän epäyhtälön molemmat puolet ovat samat, kun $x=1$. Derivaattojen tarkastelu pisteessä $x=1$ osoittaa, että $d=\frac{2}{3}$ on hyvä ehdokas eksponentiksi. On vielä todistettava, että $1+8x \leq (1+2x^{2/3})^2$ eli

$$x \leq \frac{1}{2}(x^{2/3}+x^4).$$

Mutta tämä nähdään heti todeksi aritmeettis-geometrisen epäyhtälön perusteella.

K 2001.3. Olkoon P tehtävien joukko, G ja B kilpailuun osallistuneiden tyttöjen ja poikien joukot ja $G(p)$, $B(p)$ tehtävän $p \in P$ ratkaisseiden tyttöjen ja poikien joukot. Olkoot vielä $P(g)$ ja $P(b)$ niiden tehtävien joukot, jotka $g \in G$ tai $b \in B$ ratkaisi. Olkoon $|A|$ äärellisen joukon A alkioiden lukumäärä. Oletetaan, että jokaiselle $p \in P$ joko $|G(p)| < 3$ tai $|B(p)| < 3$. Tarkastellaan 441-ruutuista 21×21-ruudukkoa, jonka rivit edustavat tyttöjä ja sarakkeet poikia. Väritetään ruudut seuraavasti: ruutua $(g,\, p)$ kohden valitaan $p \in P(g) \cap P(g)$. Väritetään ruutu punaiseksi, jos $|G(p)| < 3$, muuten mustaksi. (Jos $(g,\, p)$ on punainen, $|G(p)| \geq 3$ ja $|B(p)| < 3$.) Ruuduista ainakin 221 on toista väriä, ja koska $\left\lceil \frac{221}{21} \right\rceil = 11$, jossakin rivissä on ainakin 11 mustaa neliötä tai jossain sarakkeessa on ainakin 11 punaista neliötä. Oletetaan, että tyttöä g vastaavalla rivillä on ainakin 11 mustaa neliötä. Silloin ruudun väritykseen käytetyn tehtävän oli ratkaissut enintään kaksi poikaa. g:n on täytynyt ratkaista ainakin 6 eri tehtävää. Mutta g on ratkaissut enintään 6 tehtävää. Mutta näin ollen g on ratkaissut tasan kuusi tehtävää, ja jokaisen niistä on ratkaissut enintään kaksi poikaa. Yhdeksän poikaa ei ole ratkaissut yhtään samaa tehtävää kuin g. Sama ristiriita johdetaan, jos jossain sarakkeessa on ainakin 11 punaista neliötä.

K 2001.4. Oletetaan, että millään $b \neq c$ ei ole $S(b) \equiv S(c) \mod n!$. Lasketaan summa $\sum S(a)$ yli kaikkien permutaatioiden a ja johdetaan ristiriita summan $n!$:lla jaollisuudesta. Summassa jokaisen k_j tulee kerrotuksi $(n-1)!$ kertaa jokaisella luvuista 1, 2, ..., n. k_j:n kerroin summassa on siten

$$(n-1)!\sum_{i=1}^{k} i = \frac{1}{2}(n+1)!.$$

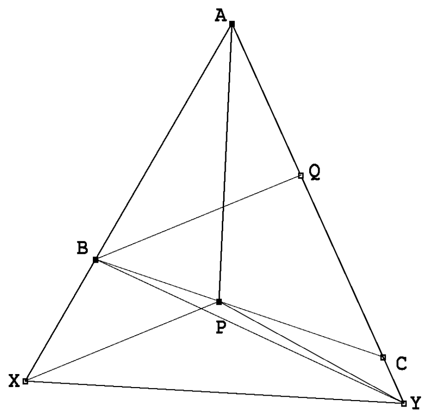
Koska sama pätee joka kertoimelle,

$$\sum S(a) = \frac{1}{2}(n+1)!\sum_{j=1}^{n} k_j. \tag{1}$$

Jos mitkään kaksi lukua $S(a)$ eivät ole kongruentit modulo $n!$, lukujen $S(a)$ jakojäännökset $n!$:lla jaettaessa ovat 0, 1, 2, ..., $n!-1$. Siis

$$\sum S(a) \equiv \frac{1}{2}(n!-1)n! \mod n!.$$

Jos n on parillinen, niin (1):ssä esiintyvä summa on $n!$:n monikerta. Koska $n!-1$ on pariton, $\dfrac{(n!-1)n!}{2}$ ei ole $n!$:n monikerta.



K 2001.5. Merkitään kolmion ABC kulmia tavanomaisesti α:lla, β:lla ja γ:lla. Jatketaan AB:tä pisteeseen X siten, että $AX = AB + BP$ ja kiinnitetään Y suoralla AC niin, että AXY on tasasivuinen. Kolmio BXP on tasakylkinen, ja koska $\angle PBX = 180° - \beta$, $\angle BXP = \beta/2$. Koska $AQ + QY = AB + BX = AB + BP = AQ + QB$, niin $QY = QB$ ja siis $\angle QBY = \angle QYB$. Koska kolmion AXY on tasasivuinen ja AP on kulman CAB puolittaja, $PY = PX$. Osoitetaan, että B, P ja Y ovat samalla suoralla. Ellei näin ole, kolmio BPY on oikea kolmio. Nyt $\angle PBQ = \angle PXB = \angle PYQ = \beta/2$. Näistä seuraa $\angle YBP = \angle PYB$ ja $PY = PB$ ja siis $PX = PY = PB = BX$. Kolmio BPX on siis tasasivuinen, joten $\beta/2 = 60°$ ja $\alpha + \beta = 180°$. Koska tämä ei ole mahdollista, BPY on degeneroitunut. Mutta tällöin $Y = C$. Koska kolmio BCQ on tasakylkinen, $120° - \beta = \gamma = \beta/2$, joten $\beta = 80°$ ja $\gamma = 40°$.

K 2001.6. Tehdään vastaoletus: $ab + cd$ on alkuluku. Nyt

$$ab + cd = (a + d)c + (b - c)a = mn,$$

missä $n = \text{s.y.t.}(a + d,\, b - c)$. Joko $m = 1$ tai $n = 1$. Oletetaan, että $m = 1$. Silloin

$$n = ab + cd > ab + cd - (a - b + c + d) = (a + d)(c - 1) + (b - c)(a + 1) > 0.$$

Koska $(a+d)(c-1)+(b-c)(a+1)$ on jaollinen n:llä, se on $\geq n$. Johdutaan siis ristiriitaan $n > n$. Oletetaan sitten, että $n = 1$. Sijoitetaan $ac + bd = (a + d)b - (b - c)a$ tehtävän yhtälöön $ac + bd = (b + d + a - c)(b + d - a + c)$; saadaan

$$(a + d)(a - c - d) = (b - c)(b + c + d).$$

Koska $n = 1$, on olemassa positiivinen kokonaisluku k, jolle pätee

$$\begin{aligned} a - c - d &= k(b - c),\\ b + c + d &= k(a + d). \end{aligned}$$

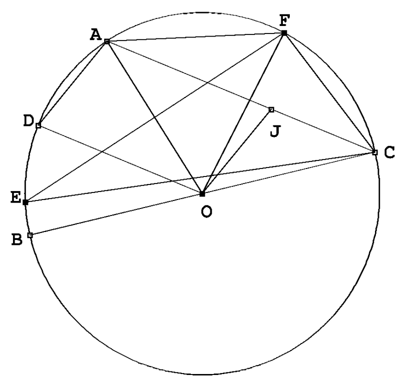
Kun nämä yhtälöt lasketaan puolittain yhteen, saadaan $a+b = k(a+b-c+d)$ ja $k(c-d) = (k - 1)(a + b)$. Jos $k = 1$, saadaan $c = d$, mikä ei ole tehtävän oletusten mukaista. Jos $k \geq 2$, niin

$$2 \geq \frac{k}{k-1} = \frac{a+b}{c-d} > 2.$$

Jälleen ristiriita. Oletus, että $ab + cd$ on alkuluku, johtaa aina ristiriitaan, joten se on väärä.

K 2002.1. Merkitään a_i:llä niiden S:n sinisten alkioiden (h, k) lukumäärää, joilla $h = i$ ja olkoon b_i niiden S:n alkioiden (h, k) lukumäärä, joille $k = i$. Tyyppiä 1 olevien S:n osajoukkojen lukumäärä on $a_0 a_1 \cdots a_{n-1}$ ja tyyppiä 2 olevien osajoukkojen lukumäärä on $b_0 b_1 \cdots b_{n-1}$. Väite tulee todistetuksi, jos voidaan osoittaa, että jonoissa $a_0, a_1, \ldots, a_{n-1}$ ja $b_0, b_1, \ldots, b_{n-1}$ eli a-jonossa ja b-jonossa on samat luvut, mahdollisesti eri järjestyksessä. Olkoon nyt c_i suurin k, jolle (i, k) on punainen. Jos (i, k) on sininen kaikilla k, asetetaan $c_i = -1$. Jos $i < j$ ja (j, c_j) on punainen, niin myös (i, c_j) on punainen, joten $c_j \le c_i$. Koska (i, k) on punainen kaikilla $k \le c_i$ ja (i, k) on sininen kaikilla $k > c_i$, niin jono c_0, $c_1, \ldots, c_{n-1}$, c-jono, määrittää täysin S:n alkioiden värityksen. Tarkastellaan nyt S:n sijasta joukkoa S_i, jonka c-jono on $c_0, c_1, \ldots, c_i, -1, \ldots, -1$. Siis $S_{n-1} = S$. Olkoon vielä S_{-1} joukko, jonka c-jono on $-1, -1, \ldots, -1$; tässä joukossa kaikki alkiot ovat sinisiä. Osoitetaan, että S_{-1}:n a-jonossa ja b-jonossa on samat alkiot ja että jos näin on joukossa S_i, niin samoin on joukossa S_{i+1}. Joukon S_0 a- ja b-jonot ovat molemmat $n-1, n-2, \ldots$, 2, 1. Joukon S_i i ensimmäistä a-jonon lukua ovat samat kuin S:n a-jonon i ensimmäistä lukua ja $a_{i+1} = n - i - 1$, $a_{i+2} = n - i - 2$ jne. Joukossa S_{i+1} alkioidenväritys on muuten sama kuin joukossa S_i, mutta alkiot $(i+1, 0)$, $(i+1, 1)$, $\ldots (i+1, c_{i+1})$ ovat S_i:ssä sinisiä ja S_{i+1}:ssä punaisia. Siis S_{i+1}:ssä $a_{i+1} = (n-i-1) - (c_{i+1}+1) = n - i - c_{i+1} - 2$. Muuten S_i:n ja S_{i+1}:n a-jonot ovat samat. Joukossa S_i ovat b_{c_i+1}, b_{c_i+2} jne. samat kuin joukon S b-jonon vastaavat luvut. Sen sijaan $b_0 = n - i - 1$, $b_1 = n - i - 2, \ldots, b_{c_i} = n - i - c_i - 1$. Siirryttäessä joukosta S_i joukkoon S_{i+1} luvut $b_0, \ldots, b_{c_{i+1}}$ pienenevät kukin yhdellä ja muut b-jonon luvut pysyvät ennallaan. Jonosta siis poistuu $n - i - 1$ ja tulee tilalle $n - i - c_{i+1} - 2$. b-jonon muutos on tasan sama kuin a-jonon, joten a- ja b-jonon lukujen tulo on S_{i+1}:ssä sama. Induktioperiaatteen nojalla näin on myös joukossa $S_{n-1} = S$.

K 2002.2. Koska $FA = FO = AO$, $\angle AOF = 60° < \angle AOC$. Puolisuora CA on puolisuorien CF ja CE välissä. Koska $\angle BOD = \frac{1}{2} \cdot \angle BOA = \angle BCA$, $OD \| CA$. Nelikulmio $ADOJ$ on siis suunnikas. Siis $AJ = OD = FA$. Tästä seuraa, että J on samalla puolella suoraa EF kuin C, ja siis kolmion ECF sisällä. Pisteet F, J, O ja E ovat kaikki A-keskisellä ympyrällä. Kehäkulmalauseen perusteella $\angle EFJ = \frac{1}{2} \cdot \angle EAJ$. Mutta kehäkulmalause alkuperäiseen ympyrään sovellettuna antaa $\angle EAJ = \angle EAC = \angle EFC$. Piste J on siis kulman EFC puolittajalla. Mutta A on kaaren EF keskipiste, joten J on myös kulman ECF puolittajalla. Se on siis kolmion ECF sisään piirretyn ympyrän keskipiste.



K 2002.3. Jotta tehtävässä kuvattu tilanne voisi ilmetä, on oltava $m > n$. Olkoot $q(x)$ ja $r(x)$ kokonaislukukertoimisia polynomeja, joille $x^m + x - 1 = q(x)(x^n + x^2 - 1) + r(x)$ ja $r(x)$:n aste on $< n$. Nyt luku $x^n + x^2 - 1$ on $r(x)$:n tekijä äärettömän monella kokonaisluvulla x. Mutta kaikilla tarpeeksi suurilla luvuilla $x^n + x^2 - 1 > r(x)$. Siis on oltava $r(x) = 0$, joten $x^m + x - 1 = q(x)(x^n + x^2 - 1)$. Mutta $x^m + x - 1 = x^{m-n}(x^n + x^2 - 1) - x^{m+2-n} + x^{m-n} + x - 1 = x^{m-n}(x^n + x^2 - 1) + (1-x)(x^{m-n+1} + x^{m-n} - 1)$.

Näin ollen x^n+x^2-1 on myös polynomin $x^{m-n+1}+x^{m-n}-1$ tekijä. Siis $m-n+1 \geq n$ eli $m \geq 2n-1$. Edelleen x^n+x^2-1 on polynomin $x^{m-n+1}+x^{m-n}-1-x^{m-2n+1}(x^n+x^2-1) = x^{m-n}-x^{m-2n+3}+x^{m-2n+1}-1 = x^{m-2n+3}(x^{n-3}-1)+(x^{m-2n+1}-1)$ tekijä. Jos $n > 3$ ja $m > 2n-1$, viimeinen polynomi on aidosti negatiivinen kaikilla $x \in (0, 1)$. Toisaalta Bolzanon lauseen nojalla x^n+x^2-1:llä on nollakohta välillä $(0, 1)$. Siis ainoa mahdollisuus on $n = 3$ ja $m = 5$. Koska $x^5+x-1 = (x^2-x+1)(x^3+x^2-1)$, $n = 3$ ja $m = 5$ on ratkaisu.

K 2002.4. Koska $d_1d_k = n$, $d_2d_{k-1} = n$ jne. ja $d_j \geq j$ kaikilla j, niin $d_1 \leq \frac{n}{1}$, $d_2 \leq \frac{n}{2}$, $\ldots$, $d_{k+1-j} \leq \frac{n}{j}$, $\ldots$ Siis

$$d \leq \frac{n^2}{1\cdot 2}+\frac{n^2}{2\cdot 3}+\cdots.$$

Mutta

$$\frac{1}{1\cdot 2}+\frac{1}{2\cdot 3}+\cdots = \left(\frac{1}{1}-\frac{1}{2}\right)+\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{3}\right)+\cdots = 1.$$

Siis $d < n^2$. Epäyhtälö on aito, koska d on äärellinen summa. Jos n on alkuluku, $d = 1\cdot n$, ja d on n^2:n tekijä. Olkoon sitten n yhdistetty luku ja olkoon p n:n pienin alkutekijä. Silloin $d_{k-1} = \frac{n}{p}$ ja $d > d_{k-1}d_k = \frac{n^2}{p}$. Mutta n^2:n pienin ykköstä suurempi tekijä on p, joten jos d on n^2:n tekijä, niin $d \leq \frac{n^2}{p}$. Siis d ei ole n^2:n tekijä, jos n on yhdistetty luku.

K 2002.5. Sijoitetaan yhtälöön $x = y$ ja $u = v = 0$. Saadaan $4f(0)f(x) = 2f(0)$. Siis joko $f(0) = 0$ tai $f(x) = \frac{1}{2}$. Funktio $f(x) = \frac{1}{2}$ toteuttaa yhtälön. Oletetaan sitten, että $f(0) = 0$. Asetetaan $x = u = 1$ ja $y = v = 0$. Saadaan $f(1)^2 = f(1)$. Siis $f(1) = 0$ tai $f(1) = 1$. Oletetaan, että $f(1) = 0$. Asetetaan $u = v = 1$, $y = 0$. Saadaan $0 = 2f(x)$. Funktio $f(x) = 0$ toteuttaa selvästi yhtälön. Oletetaan sitten, että $f(1) = 1$. Sijoitetaan $x = 0$, $u = v = 1$. saadaan $2f(y) = f(-y)+f(y)$ eli $f(-y) = f(y)$. Riittää siis, että määritetään $f(x)$:n arvot, kun $x > 0$. Todistetaan induktiolla, että $f(n) = n^2$ kaikilla ei-negatiivisilla kokonaisluvuilla n. Väite on tosi, kun $n = 0$ ja $n = 1$. Oletetaan, että se on tosi arvoilla $n-1$ ja n. Asetetaan $x = n$, $y = u = v = 1$. Saadaan $2(f(n)+1) = f(n-1)+f(n+1)$ eli $2n^2+2 = (n-1)^2+f(n+1)$. Tämä sievenee muotoon $f(n+1) = (n+1)^2$, ja induktioaskel on otettu. Olkoon sitten $x = n$, $u = \frac{m}{n}$, $y = v = 0$. Saadaan $f(n)f\left(\frac{m}{n}\right) = f(m)$ eli $f\left(\frac{m}{n}\right) = \frac{m^2}{n^2}$. Kaikilla rationaaliluvuilla q on siis $f(q) = q^2$. Asetetaan nyt $x = u$, $y = v = 0$. Saadaan $f(x)^2 = f(x^2)$. Siis $f(x) \geq 0$ kaikilla reaaliluvuilla x. Asetetaan $u = y$, $v = x$. saadaan $(f(x)+f(y))^2 = f(x^2+y^2)$ eli $f(x^2+y^2) = f(x)^2+2f(x)f(y)+f(y)^2 \geq f(x)^2 = f(x^2)$. Tästä nähdään, että f on kasvava positiivisten lukujen joukossa. Jos x on mielivaltainen reaaliluku, sitä voidaan approksimoida alhaalta ja ylhäältä x:ää kohti suppenevilla rationaalilukujonoilla r_n ja q_n. Siis $r_n^2 = f(r_n) \leq f(x) \leq f(q_n) = q_n^2$. Tästä seuraa, että $f(x) = x^2$.

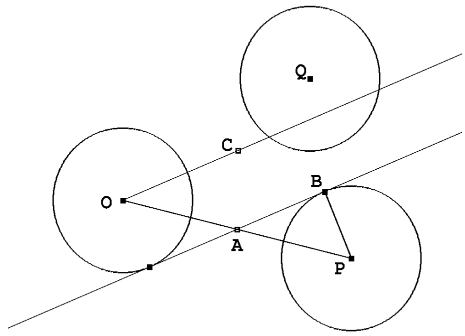
K 2002.6. Tarkastellaan ensin kahta yksikköympyrää, Γ_1 ja Γ_2; näiden keskipisteet ovat O ja P. Olkoot O:n kautta piirrettyjen Γ_2:n tangenttien sivuamispisteet X ja Y.

$\sin(\angle POX) = \dfrac{1}{OP}$, joten $\angle YOX > \dfrac{2}{OP}$. Γ_2 "varaa" kulman $\angle YOX$ ja sen ristikulman; jos suora ei saa leikata Γ_1:stä, Γ_2:sta ja kolmannesta ympyrästä kuin kahta, kolmannen ympyrän on oltava kokonaan mainittujen kahden kulman ulkopuolella. Tehtävän merkinnöin

$$\sum_{i \neq j} \frac{2}{O_iO_j} < \pi$$

kaikilla i.

Tarkastellaan sitten kolmea yksikköympyrää Γ_1, Γ_2 ja Γ_3, jotka sijaitsevat niin, että mikään suora ei leikkaa niistä kaikkia kolmea; ympyröiden keskipisteet ovat O, P ja Q. Jos A on OP:n keskipiste ja A:n kautta piirretty Γ_1:n ja Γ_2:n yhteinen tangentti sivuaa Γ_2:ta pisteessä B. Olkoon $OC \| AB$. Jos piste Q olisi kulman $\angle POC$ aukeamassa, jokin suora leikkaisi kaikki kolme ympyrää. Siis $\angle POQ > \angle PAB$. Mutta $\sin(\angle PAB) = \dfrac{2}{OP}$, joten $\angle POQ > \dfrac{2}{OP}$. Symmetrian perusteella on myös $\angle POQ > \dfrac{2}{OQ}$.



Tarkastellaan n:ää pistettä O_i. Näistä jotkin m, $m \leq n$, muodostavat kuperan m-kulmion, ja loput ovat tämän monikulmion sisäpisteitä. Oletetaan mukavuuden vuoksi, että O_n, O_1 ja O_2 ovat m-kulmion vierekkäisiä kärkiä ja että $\angle O_mO_1O_2$ on $n-2$:n kulman $\angle O_{i+1}O_1O_i$, $i = 2, 3, \ldots n-1$ summa. Jokainen näistä on edellisen tarkastelun mukaan ainakin suurempi luvuista $\dfrac{2}{O_1O_i}$, $\dfrac{2}{O_1O_2}$. Siis

$$\sum_{j=2}^{n}{}' \frac{2}{O_1O_j} < \angle O_nO_1O_2,$$

missä vasemmanpuoleisessa summassa on $n-2$ termiä; esimerkiksi pienin $\dfrac{2}{O_1O_j}$ voidaan jättää pois. Koska kuperan m-kulmion kulmien summa on $(m-2)\pi$, saadaan toistamalla päättely eri kärkien kohdalla

$$\sum_{i \neq j}{}' \frac{2}{O_iO_j} < (m-2)\pi.$$

Summassa ovat mukana kaikki muut kunkin kärkipisteen ja muiden pisteiden etäisyydet paitsi jokaisen i:n kohdalta puuttuu se j, jolle O_iO_j on suurin. Monikulmion sisäpisteissä pätee alussa johdettu arvio. Kun nämä yhdistetään, saadaan

$$S' = \sum_{i \neq j}{}' \frac{2}{O_iO_j} < (n-2)\pi.$$

Summasta puuttuvien termien huomioon ottamiseksi havaitaan, että tiettyjä summassa mukana olevia $n-2$:ta termiä kohden on ehkä lisättävä yksi, joka on kaikkia näitä pienempi.

Lopullinen summa on siis enintään

$$S' + \frac{1}{n-2}S' = \frac{n-1}{n-2}S'.$$

Siis

$$\sum_{i\neq j} \frac{1}{O_iO_j} < (n-1)\frac{\pi}{2}.$$

Tässä summassa jokainen etäisyys esiintyy kahdesti, joten

$$\sum_{i<j} \frac{1}{O_1O_2} < (n-1)\frac{\pi}{4}.$$

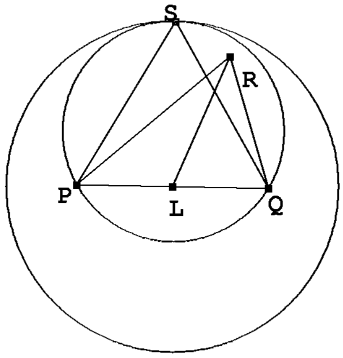
K 2003.1. Tarkastellaan joukkoa $D = \{x - y \mid x, y \in A\}$. Joukossa D on enintään $101 \cdot 100 + 1 = 10101$ alkiota. Jos $t \in A_i \cap A_j$, niin $t = x + t_i = y + t_j$, joten $t_i - t_j \in D$. Jos voidaan valita 100 lukua t_i, niin, että mikään $t_i - t_j$ ei ole joukossa D, tehtävä on suoritettu. Valitaan t_1 mielivaltaisesti. Oletetaan, että on jo valittu luvut $t_1, t_2, \ldots, t_k$, $k \leq 99$. Jokainen jo valittu luku x estää valitsemasta seuraavaksi mitään joukon $x + D = \{x + y \mid y \in D\}$ alkiota. Kiellettyjä alkioita on siis enintään $10101k \leq 99 \cdot 10101 = 999999$. $k + 1$:nen alkio voidaan siis valita.

K 2003.2. Tehtävän yhtälöstä nähdään heti, että jos $b = 1$, jokainen parillinen a toteuttaa yhtälön, ja että jos $b = 2a$, yhtälö toteutuu. Oletetaan siis, että $b > 1$ ja että $2a \neq b$. Oletetaan, että $a^2 = k(2ab^2 - b^3 + 1)$, missä k on positiivinen kokonaisluku. Silloin $2ab^2 - b^3 + 1 > 0$ eli $a > \frac{b}{2} - \frac{1}{2b^2} \geq \frac{b}{2} - \frac{1}{8}$ eli $2a > b - \frac{1}{4}$. Siis $2a \geq b$, ja koska $2a \neq b$, $2a > b$. Koska $k \geq 1$, $a^2 \geq b^2(2a - b) + 1 > b^2$, ja $a > b$. Luku a toteuttaa toisen asteen yhtälön $a^2 - 2kb^2a + k(b^3 - 1) = 0$. Jos tällä yhtälöllä on kokonaislukujuuri a_1, sen toinenkin juuri on kokonaisluku, koska $a_1 + a_2 = 2kb^2$. Juurista suurempi, sanokaamme a_1, on $\geq kb^2 > 0$. Koska juurien tulo on $k(b^3 - 1)$, pienempikin juuri on positiivinen. Yhtälön molemmat juuret ovat alkuperäisen tehtävän ratkaisujen a-lukuja. Lisäksi

$$a_2 = \frac{k(b^3-1)}{a_1} \leq \frac{k(b^3-1)}{kb^2} < b.$$

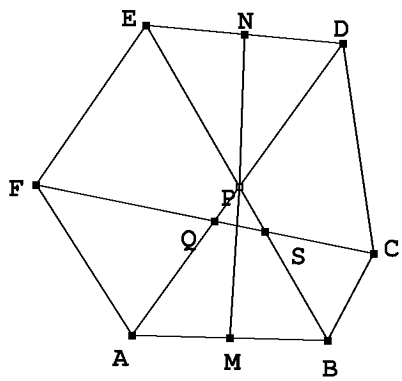
Alussa tehdyistä oletuksista seuraa, että on oltava $b = 1$ tai $a_2 = \frac{b}{2}$, ja jälkimmäisessä tapauksessa b:n on oltava parillinen: $b = 2c$. Lisäksi on oltava $k = \frac{b^2}{4}$ ja $a_1 = \frac{b^4}{2} - \frac{b}{2} = 8c^4 - c$. Mahdollisia ratkaisuja on siis kaikkiaan kolme sarjaa: $(a, b) = (2c, 1)$, $(a, b) = (c, 2c)$ ja $(a, b) = (8c^4 - c, 2c)$, missä c on mielivaltainen positiivinen kokonaisluku.

K 2003.3. Todetaan ensin, että jos kolmiossa PQR L on sivun PQ keskipiste ja $\angle QRP \geq 60°$, niin $RL \leq \frac{\sqrt{3}}{2}PQ$, ja yhtäsuuruus vallitsee vain, kun kolmio PQR on tasasivuinen. Jos nimittäin PQS on tasasivuinen kolmio ja S ja R ovat samalla puolella suoraa PQ, niin R on kolmion PQS ympäri piirretyn ympyrän sisällä. Tämä ympyrä puolestaan on L-keskisen S:n kautta kulkevan ympyrän sisäpuolella ja $LS = \frac{\sqrt{3}}{2}PQ$.



Olkoon nyt $ABCDEF$ tehtävän kuusikulmio. Tarkastellaan sen lävistäjiä AD, BE ja CF. Niiden leikkauspisteet muodostavat (mahdollisesti pisteeksi surkastuneen) kolmion. Siten ainakin kahden lävistäjän välinen kulma on $\geq 60°$. Olkoot nämä lävistäjät esimerkiksi AD ja BE. Olkoot M ja N AB:n ja DE:n keskipisteet ja olkoon P AD:n ja BE:n leikkauspiste. Kolmioepäyhtälön ja tehtävän oletuksen perusteella on

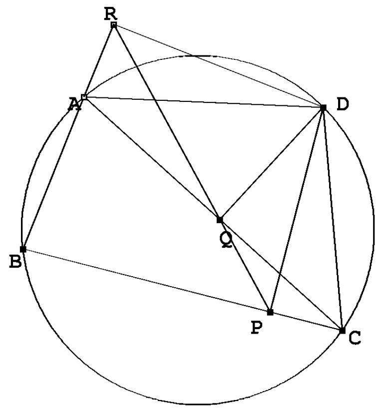
$$MN \leq MP + PN \leq \frac{\sqrt{3}}{2}(AB + DE) = MN.$$



Alussa tehdyn havainnon perusteella kolmioiden ABP ja DEP on oltava tasasivuisia. Lävistäjä CF leikkaa ainakin toisen lävistäjistä AD, BE ainakin $60°$:een kulmassa. Olkoon se AD ja olkoon leikkauspiste Q. Toistamalle edellinen päättely nähdään, että kolmiot AFQ ja CDQ ovat tasasivuisia. Mutta nyt myös CF:n ja BE:n välinen kulma on $60°$. Olkoon näiden lävistäjien leikkauspiste R. Samoin kuin edellä nähdään, että myös BCR ja EFR ovat tasasivuisia kolmioita. On siis todistettu, että jokainen kuusikulmion kulmista on $120°$.

K 2003.4. Simsonin lauseesta seuraa, että P, Q ja R ovat samalla suoralla. Koska kulmat $\angle DPC$ ja $\angle DQC$ ovat suoria, pisteet D, Q, C ja P ovat samalla ympyrällä. Siis $\angle QCD = \angle QPD$. Samoin $\angle QAD = \angle QRD$. Kolmiot ACD ja RPD ovat siis yhdenmuotoiset. Samalla tavoin johdetaan yhdenmuotoisuudet $DAB \sim DQP$ ja $DBC \sim DRQ$. Näin ollen

$$\frac{DA}{DC} = \frac{DR}{DP}.$$



Mutta myös

$$\frac{DR}{DB} = \frac{RQ}{BC}, \quad \frac{DP}{DB} = \frac{QP}{BA}.$$

Siis

$$\frac{DA}{DC} = \frac{QR}{PQ} \cdot \frac{BA}{BC}.$$

Siis $PQ = QR$, jos ja vain jos

$$\frac{DA}{DC} = \frac{BA}{BC}.$$

Mutta kulman $\angle ABC$ puolittaja jakaa AC:n suhteessa $\dfrac{BA}{BC}$ ja kulman $\angle ADC$ puolittaja jakaa AC:n suhteessa $\dfrac{AD}{DC}$. Jakopisteet yhtyvät, jos ja vain jos $PQ = QR$.

K 2003.5. Tehtävän epäyhtälö ei muutu, jos jokaiseen x_i:hin lisätään sama vakio. Voidaan siis olettaa, että $\sum_{i,j} x_i = 0$. Selvästi

$$\sum_{i,j=1}^{n} |x_j - x_i| = 2\sum_{i<j}(x_j - x_i).$$

Oikean puolen summassa x_i esiintyy $i-1$ kertaa ja $-x_i$ $n-i$ kertaa. Summa on siis

$$\sum_{i=1}^{n}(2i-n-1)x_i,$$

joten

$$\sum_{i,j=1}^{n} |x_i - x_j| = 2\sum_{i=1}^{n}(2i-n-1)x_i.$$

Cauchyn–Schwarzin epäyhtälön perusteella

$$\left(\sum_{i,j=1}^{n} |x_i - x_j|\right)^2 \le 4\sum_{i=1}^{n}(2i-n-1)^2\sum_{i=1}^{n}x_i^2.$$

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{n}(2i-(n+1))^2 &= \sum_{i=1}^{n}\left(4i^2 - 4i(n+1) + (n+1)^2\right)\\ &= 4\frac{n(n+1)(2n+1)}{6} - 4(n+1)\frac{n(n+1)}{2} + n(n+1)^2\\ &= n(n+1)\left(\frac{2}{3}(2n+1) - 2(n+1) + (n+1)\right) = n(n+1)\frac{n-1}{3} = \frac{1}{3}n(n^2-1),\end{aligned}$$

joten

$$\left(\sum_{i,j=1}^{n}|x_i-x_j|\right)^2 \le \frac{4}{3}n(n^2-1)\sum_{i=1}^{n}x_i^2.$$

Toisaalta alussa tehdyn oletuksen perusteella

$$\sum_{i,j=1}^{n}(x_i-x_j)^2 = n\sum_{i=1}^{n}x_j^2 - 2\sum_{i=1}^{n}x_i\sum_{j=1}^{n}x_j + n\sum_{j=1}^{n}x_j^2 = 2n\sum_{i=1}^{n}x_i^2.$$

Siis todellakin

$$\left(\sum_{i,j=1}^{n}|x_i-x_j|\right)^2 \le \frac{2}{3}(n^2-1)\sum_{i,j=1}^{n}(x_i-x_j)^2.$$

Cauchyn–Schwarzin epäyhtälön yhtäsuuruusehdosta seuraa, että yhtäsuuruus vallitsee, kun $x_i = a(2i-n-1)$ kaikilla i. Tällöin (x_i) on aritmeettinen jono. Olkoon toisaalta $x_1, x_2, \ldots, x_n$ aritmeettinen jono, jonka summa on 0 ja erotus d. Silloin $x_i = x_1+(i-1)d = \frac{d}{2}\left(2i+\frac{2x_1}{d}-2\right)$. Mutta tehdyn oletuksen mukaan $-x_1 = x_n = x_1+(n-1)d$, joten $2x_1 = (1-n)d$. Siis $x_i = \frac{d}{2}(2i-n-1)$, ja yhtäsuuruus vallitsee.

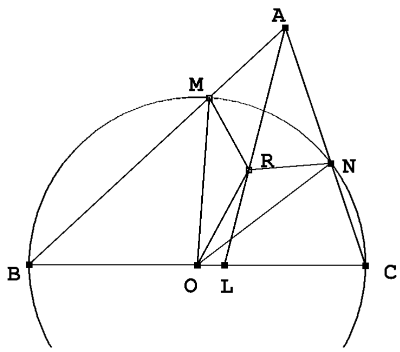
K 2003.6. Koska

$$s = \frac{p^p-1}{p-1} = 1+p+p^2+\cdots+p^{p-1} \equiv p+1 \bmod p^2,$$

luvulla s on ainakin yksi alkutekijä q, joka ei ole kongruentti luvun 1 kanssa modulo p^2. Väitetään, että q:lla on tehtävässä vaadittu ominaisuus. Vastaoletuksena oletamme, että jollain kokonaisluvulla n on $n^p \equiv p \bmod q$. Koska q on luvun p^p-1 tekijä, on $n^{p^2} \equiv p^p \equiv 1 \bmod q$. Koska q on alkuluku, $n^{q-1} \equiv 1 \bmod q$. Eukleideen algoritmin avulla nähdään, että jos d on p^2:n ja $q-1$:n suurin yhteinen tekijä, niin $n^d \equiv 1 \bmod q$. Luku p^2 ei ole luvun $q-1$ tekijä. Lukujen $q-1$ ja p^2 suurin yhteinen tekijä voi olla 1 tai p. Tästä seuraa, että $n^p \equiv 1 \bmod q$. Näin ollen $p \equiv 1 \bmod q$. Siis $1+p+\cdots+p^{p-1} \equiv p \bmod q$. Koska q on luvun $1+p+\cdots+p^{p-1}$ tekijä, $p \equiv 0 \bmod q$. Johduttiin ristiriitaan, joten vastaoletuksen täytyy olla väärä.

K 2004.1. Koska $BCNM$ on jännenelikulmio,

$$\angle MNA = 180^\circ - \angle CNM = \angle ABC.$$



Samoin $\angle AMN = \angle ACB$. Oletuksesta seuraa, että $\angle ABC \ne \angle ACB$, joten $\angle AMN \ne \angle ANM$. Kolmio OMN on tasakylkinen, joten kulman $\angle MON$ puolittaja on myös sivun MN keskinormaali. Siis $MR = NR$. Kolmioissa AMR ja ANR on kaksi paria yhtä pitkiä sivuja ja yksi pari yhtä suuria kulmia. Koska kulmat $\angle AMN$ ja $\angle ANM$ ovat eri suuria, mutta $\angle NMR = \angle MNR$, on $\angle AMR \neq \angle ANR$. Yhtenevyyslauseen ssk perusteella on siis $\angle AMR = 180° - \angle ANR$. Tämä merkitsee, että $AMRN$ on jännenelikulmio. Tästä puolestaan seuraa, että $\angle MRA = \angle MNA$ ja $\angle ARN = \angle AMN$. Leikatkoon AR sivun BC pisteessä L. Kolmiosta ABL saadaan $\angle ALC = \angle ABC + \angle BAL$ ja kolmiosta AMR samoin $\angle RMB = \angle MRA + \angle RAM$. Edellä sanotun perusteella kulmat $\angle ALC$ ja $\angle RMB$ ovat samat. Tämä merkitsee, että $MBLR$ on jännenelikulmio. Aivan samoin todistetaan, että $NRLC$ on jännenelikulmio. Sivun BC piste L on siis molempien kolmioiden MBR ja NRC yhteinen piste.

K 2004.2. Osoitetaan, että kysytyt polynomit ovat $P(x) = a_4x^4 + a_2x^2$, missä a_4 ja a_2 ovat mielivaltaisia reaalilukuja. Koska $a = b = c = 0$ toteuttaa tehtävässä annetun ehdon, on $3P(0) = 2P(0)$ eli $P(0) = 0$. Edelleen kaikilla x luvut $a = x$, $b = c = 0$ toteuttavat annetun ehdon, joten $P(x) + P(-x) = 2P(x) = 0$. Siis $P(x) = P(-x)$. Polynomissa, joka on samalla parillinen funktio, kaikkien x:n parittomien potenssien kertoimet ovat nollia. Tehtävän ehdon toteuttavia lukukolmikkoja on äärettömän paljon: jos $(a,\, b,\, c)$ toteuttaa yhtälön, myös $(ta,\, tb,\, tc)$ toteuttaa sen kaikilla $t \in \mathbb{R}$. Esimerkiksi $(1,\, 2,\, -\frac{2}{3})$ toteuttaa ehdon ja siten kaikki lukukolmikot $(3t,\, 6t,\, -2t)$. Siis $P(-3t) + P(8t) + P(-5t) = 2P(7t)$ kaikilla $t \in R$. Kaksi polynomia on identtisesti samoja vain, jos niiden kaikki kertoimet ovat samoja. Jos siis $P(x) = a_2x^2 + a_4x^4 + \ldots$, niin $a_{2k}(3^{2k} + 8^{2k} + 5^{2k}) = 2 \cdot 7^{2k}a_{2k}$. Nyt $3^2+8^2+5^2 = 98 = 2\cdot 7^2$ ja $3^4+8^4+5^4 = 4802 = 2\cdot 7^4$. Mutta $8^6-2\cdot 7^6 = 2(2^{17}-49^3) > 2(128\cdot 1000-125000) > 0$, ja kun $k \geq 8$, niin $8^k - 2\cdot 7^k = (7+1)^k - 2\cdot 7^k > 7^k + k\cdot 7^{k-1} - 2\cdot 7^k > 0$. Ainoat polynomit, jotka voivat toteuttaa ehdon, ovat polynomit $P(x) = a_2x^2 + a_4x^4$. On vielä osoitettava, että kaikki tällaiset polynomit toteuttavat tehtävän ehdot. Jos $P_1(x)$ ja $P_2(x)$ ovat tehtävän ehdot täyttäviä polynomeja, niin $\alpha P_1(x) + \beta P_2(x)$ ovat myös tehtävän ehdot täyttäviä polynomeja kaikilla $\alpha,\, \beta \in \mathbb{R}$. Riittää siis, että todetaan polynomien x^2 ja x^4 toteuttavan tehtävän ehdot. Jos $ab + bc + ca = 0$, niin $(a-b)^2 + (b-c)^2 + (c-a)^2 = 2(a^2 + b^2 + c^2) - 4(ab + bc + ca) = 2(a^2 + b^2 + c^2)$ ja $2(a + b + c)^2 = 2(a^2 + b^2 + c^2) + 4(ab + bc + ca) = 2(a^2 + b^2 + c^2)$. Polynomi x^2 toteuttaa tehtävän ehdon. Samoin ehdoin $2(a + b + c)^4 = 2(a^2 + b^2 + c^2)^2 = 2(a^4 + b^4 + c^4) + 4(a^2b^2 + b^2c^2 + c^2a^2)$ ja $(a-b)^4 + (b-c)^4 + (c-a)^4 = 2(a^4 + b^4 + c^4) - 4(a^3b + ab^3 + b^3c + bc^3 + ac^3 + a^3c) + 6(a^2b^2 + b^2c^2 + c^2a^2)$. On siis näytettävä, että $2(a^3b + ab^3 + b^3c + bc^3 + ac^3 + a^3c) = a^2b^2 + b^2c^2 + c^2a^2$. Mutta $0 = (ab+bc+ca)^2 = a^2b^2 + b^2c^2 + c^2a^2 + 2(ab^2c + a^2bc + abc^2)$. Onkin siis näytettävä, että $a^3b+ab^3+b^3c+bc^3+ac^3+a^3c+ab^2c+a^2bc+abc^2 = 0$. Mutta $a^3b+a^2bc = a^2(ab+bc) = -a^3c$, $b^3c + ab^2c = b^2(bc + ca) = -ab^3$ ja $ac^3 + abc^2 = c^2(ca + ab) = -bc^3$. Kun nämä sijoitetaan edelliseen lausekkeeseen, nähdään, että yhtälö toteutuu. Siis x^4 toteuttaa yhtälön, ja väite on todistettu.

K 2004.3. Osoitetaan, että peitto on mahdollinen jos ja vain jos luvuista m ja n yksi on jaollinen kolmella ja yksi neljällä eikä kumpikaan luvuista m, n ole 1, 2 tai 5. Oletetaan ensin, että jokin $m \times n$-suorakaide on peitetty koukuilla. Jokaista koukkua A kohden on yksi ja vain yksi koukku B, joka peittää koukun A sisään jäävän "poukaman". A ja B voivat yhdistyä vain kahdella eri tavalla, joko 3×4-suorakaiteeksi tai ei-konveksiksi kahdeksankulmioksi, jonka sivut ovat 3, 2, 1, 2, 3, 2, 1, 2. Kummassakin kuviossa on 12 neliötä, joten peitto voi onnistua vain, jos mn on jaollinen 12:lla. Osoitetaan, että joko m tai n on jaollinen 4:llä. Ellei näin ole, sekä m että n ovat parillisia. Numeroidaan rivit ja sarakkeet ja kirjoitetaan luku 1 jokaiseen sellaiseen ruutuun, jonka rivi- ja sarakenumeroista tasan toinen on neljällä jaollinen ja 2 jokaiseen sellaiseen ruutuun, jonka sekä rivi- että sarakenumero on neljällä jaollinen. Koska rivejä ja sarakkeita on parillinen määrä, koko ruudukkoon kirjoitettujen lukujen summa on parillinen. Toisaalta 3×4-suorakaiteeseen kirjoitettujen lukujen summa voi olla vain 3 tai 7 ja edellä kuvattuun kahdeksankulmaiseen koukkuyhdistelmään kirjoitettujen lukujen summa voi olla vain 5 tai 7. Tästä seuraa, että koukkupareja on oltava parillinen määrä, josta puolestaan seuraa, että mn on jaollinen 24:llä. Tämä on ristiriidassa sen kanssa, että kumpikaan luvuista m ja n ei olisi jaollinen neljällä. On selvää, että kumpikaan luvuista m ja n ei voi olla 1 tai 2. Myöskään 5 ei tule kyseeseen, kuten helposti nähdään, jos yritetään sijoittaa koukkuja viiden neliön pituiselle sivulle.

On vielä osoitettava, että esitetyt välttämättömät ehdot ovat riittäviä. Jos $3 \mid m$ ja $4 \mid n$ tai $4 \mid m$ ja $3 \mid n$, asia on triviaali: 3×4-suorakaiteet riittävät. Jos $12 \mid m$ ja $n \notin \{1, 2, 5\}$, $3 \not| n$, $4 \not| n$, niin $n = 3a + 4b$ joillain positiivisilla kokonaisluvuilla a ja b (riittää, kun havaitaan, että 7, 11, 13, 14, 17 ja 19 ovat tätä muotoa). $m \times n$ suorakaide voidaan jakaa $m \times 3a$- ja $m \times 4b$-suorakaiteiksi, jotka voidaan peittää 3×4-suorakaiteilla.

K 2004.4. Symmetrian perusteella riittää, kun osoitetaan, että $t_1 < t_2 + t_3$. On voimassa

$$\sum_{i=1}^{n} t_i \sum_{i=1}^{n} t_i^{-1} = n + t_1\left(\frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_3}\right) + \frac{1}{t_1}(t_2 + t_3) + \sum_{\substack{1 \le i < j \le n \\ (i,\,j) \ne (1,\,2),\,(1,\,3)}} \left(\frac{t_i}{t_j} + \frac{t_j}{t_i}\right).$$

Aritmeettis-geometrisen epäyhtälön perusteella

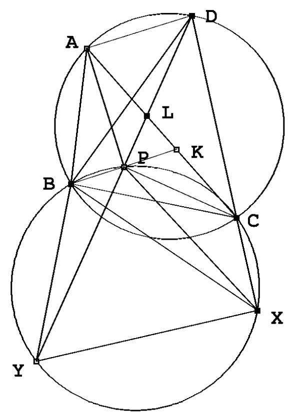
$$\frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_3} \ge \frac{2}{\sqrt{t_2 t_3}}, \quad t_2 + t_3 \ge 2\sqrt{t_2 t_3} \quad \text{ja} \quad \frac{t_i}{t_j} + \frac{t_j}{t_i} \ge 2.$$

Oletuksen perusteella on siis, kun merkitään $a = t_1/\sqrt{t_2 t_3}$,

$$n^2 + 1 > n + \frac{2t_1}{\sqrt{t_2 t_3}} + \frac{2\sqrt{t_2 t_3}}{t_1} + 2\left(\binom{n}{2} - 2\right) = 2a + \frac{2}{a} + n^2 - 4.$$

a toteuttaa toisen asteen epäyhtälön $2a + 2/a - 5 < 0$, jonka ratkaisujoukko on $(1/2, 2)$. Siis $t_1 < 2\sqrt{t_2 t_3} \le t_2 + t_3$.

K 2004.5. Voidaan olettaa, että P on kolmiossa BCD ja kolmiossa ABC. Oletetaan ensin, että $ABCD$ on jännenelikulmio. Leikatkoon BP AC:n pisteessä K ja DP AC:n pisteessä L. Tehtävän oletuksesta ja kehäkulmalauseen seurauksista $\angle ABD = \angle ACD$, $\angle BCA = \angle BDA$ seuraa, että kolmiot ABD, KBC ja LCD ovat yhdenmuotoiset. Tästä seuraa $\angle PLK = \angle PKL$, joten $PK = PL$. Myös kolmiot ADL ja BDC ovat yhdenmuotoisia. Siis



$$\frac{AL}{BC} = \frac{AD}{BD} = \frac{KC}{BC}.$$

Siis $AL = KC$. Mutta tästä seuraa, että kolmiot ALP ja CKP ovat yhteneviä (sks). Siis $AP = CP$.

Oletetaan sitten, että $AP = PC$. Oletetaan, että kolmion BCP ympäri piirretty ympyrä leikkaa suoran DC myös pisteessä X ja suoran PD myös pisteessä Y. Silloin $\angle PXC = \angle PBC = \angle ABP$. Tästä seuraa, että kolmioit ABD ja PXD ovat yhdenmuotoisia. Siis

$$\frac{AD}{PD} = \frac{BD}{DX}.$$

Tästä seuraa, että kolmiot PDA ja XDB ovat yhdenmuotoisia (sks), joten

$$\frac{BX}{AP} = \frac{BD}{AD} = \frac{XD}{PD}. \tag{1}$$

Koska $PYXC$ on jännenelikulmio, $\angle PYX = \angle PCD$. Kolmiot DPC ja DXY ovat siis yhdenmuotoisia. Siis

$$\frac{YX}{CP} = \frac{XD}{PD}. \tag{2}$$

Koska $AP = PC$, yhtälöistä (1) ja (2) seuraa $BX = YX$. Näin ollen $\angle DCB = \angle DCP + \angle PCB = \angle PYX + \angle PYB = \angle XYB = \angle XBY = \angle XPY = \angle PDX + \angle PXD = \angle ADB + \angle ABD = 180° - \angle DAB$. Edellisen yhtälöketjun ensimmäisen ja viimeisen kulman yhtäsuuruus osoittaa, että $ABCD$ on jännenelikulmio.

K 2004.6. Jos luku päättyy nollaan ja sen toiseksi viimeinen numero on parillinen, luvulla ei ole vuorottelevaa monikertaa. Osoitetaan, että kaikilla muilla luvuilla, siis luvuilla, jotka eivät ole jaollisia 20:llä, sellainen on. Merkitään numeroin a_k, a_{k-1}, ..., a_1 kirjoitettavaa lukua $\overline{a_k a_{k+1} \dots a_1}$. Merkintä $u^k \| a$ tarkoittaa, että $u^k \mid a$, mutta $u^{k+1} \nmid a$. Osoitetaan ensin, että kaikilla luvun 2 potensseilla on vuorotteleva monikerta, jonka numeroiden lukumäärä on parillinen. Tähän riittää, jos voidaan konstruoida päättymätön jono väliin $[0, 9]$ kuuluvia kokonaislukuja a_n niin, että $a_n \equiv n + 1 \bmod 2$, $2^{2n-1} \| \overline{a_{2n-1} a_{2n-2} \dots a_1}$ ja $2^{2n+1} \| \overline{a_{2n} a_{2n-1} \dots a_1}$ kaikilla n. Aloitetaan konstruktio luvuista $a_1 = 2$ ja $a_2 = 7$. Oletetaan, että jono on jo konstruoitu lukuun a_{2n} asti. Asetetaan $a_{2n+1} = 4$. Koska $2^{2n+2} \| 4 \cdot 10^{2n}$ ja $2^{2n+1} \| \overline{a_{2n} a_{2n-1} \dots a_1}$, niin $2^{2n+1} \| \overline{a_{2n+1} a_{2n} \dots a_1}$. Merkitään $\overline{a_{2n+1} a_{2n} \dots a_1} = 2^{2n+1} A$, missä A on pariton luku. Luvun a_{2n+2} on nyt oltava pariton ja on oltava $2^{2n+3} \| \overline{a_{2n+2} a_{2n+1} \dots a_1} = a_{2n+2} \cdot 10^{2n+1} + \overline{a_{2n+1} a_{2n} \dots a_1} = 2^{2n+1}(a_{2n+2} 5^{2n+1} + A)$. Tämä toteutuu, jos $5a_{2n+2} + A \equiv 4 \bmod 8$. Lineaarisella kongruenssiyhtälöllä on ratkaisu a_{2n+2}; ratkaisu voidaan aina valita joukosta $\{0, 1, 2, \dots, 7\}$. Konstruktiota voidaan siis jatkaa.

Osoitetaan sitten, että jokaisella muotoa $2 \cdot 5^n$ olevalla luvulla on vuorotteleva monikerta, jossa on parillinen määrä numeroita. Tähän riittää, että konstruoidaan päättymätön jono väliin $[0, 9]$ kuuluvia kokonaislukuja b_n, joille $b_n \equiv n + 1 \bmod 2$ ja $2 \cdot 5^n | \overline{b_n b_{n-1} \dots b_1}$ kaikilla n. Aloitetaan asettamalla $b_1 = 0$, $b_2 = 5$. Oletetaan, että luvut $b_1, b_2, \dots b_n$ on jo määritelty ja olkoon $\overline{b_n b_{n-1} \dots b_1} = 5^q B$, missä B ei ole jaollinen viidellä ja $q \geq n$. Luvun b_{n+1} on toteutettava $b_{n+1} \equiv n + 2 \bmod 2$, ja 5^{n+1}:n on oltava luvun $\overline{b_{n+1} b_n \dots b_1} = b_{n+1} 10^n + \overline{b_n b_{n-1} \dots b_1} = 5^n(b_{n+1} 2^n + 5^{q-n} B)$ tekijä. Luvun $b_n 2^n + 5^{q-n} B$ on oltava viidellä jaollinen. Kiinalaisen jäännöslauseen nojalla kongruenssiparilla

$$\begin{cases} x \equiv 2^n(n+1) \bmod 2^{n+1} \\ x \equiv -5^{q-n} B \bmod 5 \end{cases}$$

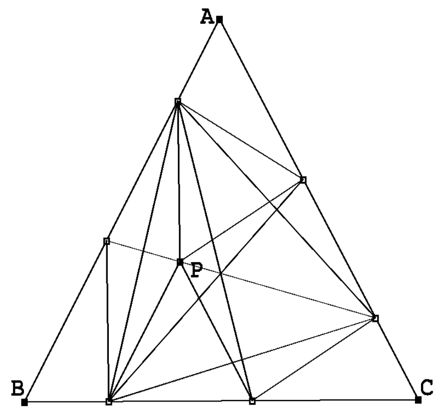
on ratkaisu x. Lisäksi $x = 2^n y$, missä y on kokonaisluku. Kongruenssiparilla

$$\begin{cases} y \equiv n+1 \bmod 2 \\ 2^n y + 5^{q-n}B \equiv 0 \bmod 5 \end{cases}$$

on siis ratkaisu y. Ratkaisu voidaan aina valita joukosta $\{0, 1, \ldots, 9\}$.

Siirrytään sitten yleisen luvun $n = 2^\alpha 5^\beta k$, missä k ei ole jaollinen kahdella eikä viidellä. Jos $20 \not| n$, niin $2^\alpha 5^\beta$ on joko kahden tai viiden potenssi tai muotoa $2 \cdot 5^\beta$.Edellä sanotun perusteella $2^\alpha 5^\beta$:lla on kaikissa näissä tapauksissa vuorotteleva monikerta M, jonka numeroiden määrä on parillinen, $2m$. Kaikilla $p > 1$ luku C_pM, missä $C_p = 1 + 10^{2p} + 10^{4p} + \cdots + 10^{(p-1)2m}$ on $2^\alpha 5^\beta$:n vuorotteleva monikerta. Luvuista C_p jotkin kaksi, esimerkiksi C_{p_1} ja C_{p_2}, ovat laatikkoperiaatteen perusteella kongruentteja modulo k. Mutta $C_{p_2} - C_{p_1} = C_{p_2-p_1}10^{p_1 2m}$, joten $k|C_{p_2-p_1}$. Luku $C_{p_2-p_1}M$ on siten luvun $n = 2^\alpha 5^\beta k$ vuorotteleva monikerta.

K 2005.1. Olkoon P se kolmion ABC sisäpiste, jolle A_1A_2P on tasasivuinen kolmio. Koska $A_2P \| B_1B_2$, $A_1PC_1C_2$ on suunnikas; koska $A_2B_1 = B_1B_2$, $B_2PA_2B_1$ on vinoneliö. Samoin perustein $A_1PC_1C_2$ on vinoneliö. Mutta tästä seuraa, että B_2C_1P on tasasivuinen kolmio. Mutta tämä merkitsee, että $\angle A_1A_2B_1 = 60° + \angle PA_2B_1 = 60° + \angle B_1B_2P = \angle B_1B_2C_1$. Kolmiot $A_1A_2B_1$ ja $B_1B_2C_1$ ovat siis yhteneviä tasakylkisiä kolmioita ja $A_1B_1 = B_1C_1$. Symmetrian vuoksi on oltava $C_1A_1 = A_1B_1$ ja kolmion $C_1C_2A_1$ yhtenevä kolmioiden $A_1A_2B_1$ ja $B_1B_2C_1$ kanssa. Mutta tästä seuraa, että B_1C_2, C_1A_2 ja A_1B_2 yhtyvät kolmion $A_1B_1C_1$ korkeusjanoihin, ja leikkaavat toisensa samassa pisteessä.



K 2005.2. Kaikille indekseille $i < j$ pätee $a_i \neq a_j$; ellei näin olisi, jaettaessa lukuja a_1, a_2, $\ldots$, a_j j:llä saataisiin enintään $j-1$ eri jakojäännöstä. Havaitaan myös, että jos $i < j \le k$, niin $|a_i - a_j| \le k-1$. Jos olisi $m = |a_i - a_j| \ge k$, lukujen a_i ja a_j jakojäännökset m:llä jaettaessa olisivat samat. Olkoon nyt $k \ge 1$ mielivaltainen. Olkoon a_{i_k} pienin ja a_{j_k} suurin luvuista a_1, a_2, $\ldots$, a_k. Silloin $a_{j_k} - a_{i_k} \le k-1$; koska luvut a_1, $\ldots$, a_k ovat eri lukuja, on $a_{j_k} - a_{i_k} \ge k-1$. Siis $a_{j_k} - a_{i_k} = k-1$, joten luvut a_1, a_2, $\ldots$, a_k ovat kaikki lukujen a_{i_k} ja a_{j_k} väliset luvut. Olkoon nyt x mielivaltainen kokonaisluku. Koska tehtävän jonossa on äärettömän monta negatiivisstа lukua, siinä on luku $a_i \le x$. Koska jonossa on äärettömän monta positiivista lukua, siinä on luku $a_j \ge x$. Jos $k \ge i$, $k \ge j$, niin edellä sanotun perusteella x on lukujen a_1, a_2, $\ldots$, a_k joukossa.

K 2005.3. *1. ratkaisu.* Kun tehtävän epäyhtälö kirjoitetaan muotoon

$$\frac{x^2}{x^5+y^2+z^2} + \frac{y^2}{y^5+z^2+x^2} + \frac{z^2}{z^5+x^2+y^2} \le \frac{x^5}{x^5+y^2+z^2} + \frac{y^5}{y^5+z^2+x^2} + \frac{z^5}{z^5+x^2+y^2}$$

ja epäyhtälön molemmille puolille lisätään

$$\frac{y^2+z^2}{x^5+y^2+z^2}+\frac{z^2+z^2}{y^5+z^2+x^2}+\frac{x^2+y^2}{z^5+x^2+y^2},$$

todistettava epäyhtälö saadaan yhtäpitävään muotoon

$$(x^2+y^2+z^2)\left(\frac{1}{x^5+y^2+z^2}+\frac{1}{y^5+z^2+x^2}+\frac{1}{z^5+x^2+y^2}\right)\le 3.$$

Kun sovelletaan Cauchyn ja Schwarzin epäyhtälöä ja ehtoa $xyz \ge 1$, saadaan

$$(x^5+y^2+z^2)(yz+y^2+z^2)\ge\left(x^{\frac{5}{2}}(yz)^{\frac{1}{2}}+y^2+z^2\right)^2\ge(x^2+y^2+z^2)^2$$

eli

$$\frac{x^2+y^2+z^2}{x^5+y^2+z^2}\le\frac{yz+y^2+z^2}{x^2+y^2+z^2}.$$

Kun tämä ja siitä kiertovaihtelulla saatavat epäyhtälöt lasketaan puolittain yhteen,saadaan

$$\frac{x^2+y^2+z^2}{x^5+y^2+z^2}+\frac{x^2+y^2+z^2}{y^5+z^2+x^2}+\frac{x^2+y^2+z^2}{z^5+x^2+y^2}\le 2+\frac{yz+zx+xy}{x^2+y^2+z^2}.$$

Tunnetusti $x^2+y^2+z^2\ge yz+zx+xy$, joten todistus on valmis.

2. ratkaisu. (Moldovalaisen *Boreico Iurien* erikoispalkinnolla palkittu ratkaisu.) Kaikilla x pätee

$$\frac{x^5-x^2}{x^5+y^2+z^2}\ge\frac{x^5-x^2}{x^5+(y^2+z^2)x^3}.$$

Jos nimittäin $x\ge 1$, vasemman puolen nimittäjä on suurempi kuin oikean puolen ja epäyhtälön molemmat puolet ovat ei-negatiivisia, jos taas $x<1$, epäyhtälön molemmat puolet ovat negatiivisia ja oikean puolen nimittäjä on pienempi kuin vasemman puolen. Siis

$$\frac{x^5-x^2}{x^5+y^2+z^2}\ge\frac{x^2+x^{-1}}{x^2+y^2+z^2}.$$

Koska vastaavat epäyhtälöt ovat voimassa kiertovaihtelun jälkeen, todistettavaksi epäyhtälöksi jää

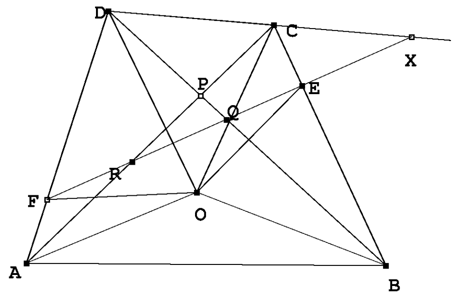
$$x^2+y^2+z^2\ge\frac{1}{x}+\frac{1}{y}+\frac{1}{z}=yz+zx+xy,$$

mikä on tunnetusti totta.

K 2005.4. Riittää, kun osoitetaan, että jokainen alkuluku on tekijänä jossain luvuista a_n. Koska $a_2=4+9+36-1=48$, ainakin alkuluvut 2 ja 3 ovat tällaisia alkulukuja. Olkoon sitten $p>3$ mielivaltainen alkuluku. Lasketaan modulo p. Fermat'n pienen lauseen nojalla $2^{p-1}\equiv 1$, $3^{p-1}\equiv 1$ ja $6^{p-1}\equiv 1$. Siis $6=3+2+1\equiv 3\cdot 2^{p-1}+2\cdot 3^{p-1}+6^{p-1}=$

$6(2^{p-2}+3^{p-2}+6^{p-2})$. Koska 6:lla ja p:llä ei ole yhteisiä tekijöitä, $2^{p-2}+3^{p-2}+6^{p-2} \equiv 1$, joten $a_{p-2} = 2^{p-2}+3^{p-2}+6^{p-2}-1$ on jaollinen p:llä.

K 2005.5. Olkoon O janojen AC ja BD keskinormaalien leikkauspiste. Osoitetaan, että jokaisen kolmion PQR ympäri piirretty ympyrä kulkee pisteen O kautta. Kolmioissa AOD ja COB on $AD = BC$, $OA = OC$ ja $OD = OB$. Kolmiot ovat siis yhteneviä. Suoritetaan kierto pisteen O ympäri niin, että OB kiertyy OD:ksi. Silloin kolmio OBC kiertyy kolmioksi ODA. Koska $BE = DF$, piste E kiertyy pisteeksi F. Siis $OE = OF$ ja kulmat $\angle FOE$, $\angle DOB$ ja $\angle AOC$ ovat yhtä suuret (kiertokulman suuruiset). Kolmiot EOF, BOD ja COA ovat siis yhdenmuotoisia tasakylkisiä kolmioita. Siis



$$\frac{AC}{BD} = \frac{OC}{OB}. \tag{1}$$

Oletetaan ensin, että EF ei ole AB:n tai CD:n suuntainen. Oletetaan esimerkiksi, että suora EF leikkaa suoran CD pisteessä X. Sovelletaan Menelaoksen lausetta suoraan FE ja kolmioihin ACD, BCD. Saadaan

$$\frac{AR}{RC} \cdot \frac{CX}{XD} \cdot \frac{DF}{FA} = 1, \qquad \frac{DQ}{QB} \cdot \frac{BE}{EC} \cdot \frac{CX}{XD} = 1,$$

joista

$$\frac{AR}{RC} = \frac{AF}{FD} \cdot \frac{DX}{XC} = \frac{CE}{EB} \cdot \frac{DX}{XC} = \frac{DQ}{QB}.$$

Samaan tulokseen päädytään, jos tarkastellaan EF:n ja AB:n leikkaamista. Jos taas $EF \| AB$ ja $EF \| CD$, $ABCD$:n on oltava tasasivuinen puolisuunnikas ja E:n ja F:n sen sivujen keskipisteitä. Tällöin triviaalisti

$$\frac{AR}{RC} = \frac{DQ}{QB}.$$

Yhtälöistä (1) ja

$$\frac{RC}{QB} = \frac{AR}{DQ} = \frac{AC - RC}{DB - QB}$$

ratkaistaan

$$\frac{RC}{QB} = \frac{OC}{OB}$$

Kolmiot OBQ ja OCR ovat yhdenmuotoiset (sks), joten $\angle CRO = \angle OQB$. Nelikulmiossa $PROQ$ ovat vastakkaiset kulmat vieruskulmia, joten nelikulmio on jännenelikulmio. Nelikulmion ympäri piirretty ympyrä on samalla kolmion PRQ ympäri piirretty ympyrä, joten todistus on valmis.

K 2005.6. Olkoon kilpailijoita n kappaletta. Olkoon N järjestettyjen parien (K, T), missä K on kilpailija ja T on tehtävä, jonka K ratkaisi, lukumäärä. Tehtäväpareja on $\binom{6}{2} = 15$ kappaletta. Koska jokaisen parin ratkaisi yli $\frac{2}{5}$ kilpailijoista,

$$N \geq 15 \cdot \frac{2n+1}{5} = 6n + 3. \tag{1}$$

Olkoon tasan viisi tehtävää ratkaisseiden kilpailijoiden lukumäärä k. Näistä kukin on ratkaissut $\binom{5}{2} = 10$ tehtäväparia, mutta muut $n - k$ kilpailijaa enintään $\binom{4}{2} = 6$ tehtäväparia. Siis

$$N \leq 10k + 6(n-k) = 6n + 4k. \tag{2}$$

Siis $6n + 3 \leq 6n + 4k$, joten $k \geq 1$. Jos $2n+1$ ei ole jaollinen 5:llä, $2n+1$ kaavassa (1) voidaan korvata luvulla $2n+2$, jolloin N:n alarajaksi tulee $6n+6$. Tällöin $k \geq 2$. Jos taas joku kilpailija ratkaisi enintään 3 tehtävää, yläraja kaavassa (2) pienenee 3:lla, ja saadaan taas $k \geq 2$.

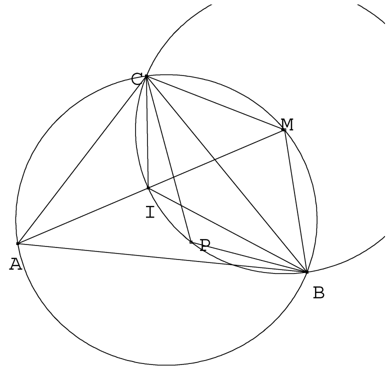
Tarkasteltavaksi jää tapaus, jossa $5|(2n+1)$ ja kaikki kilpailijat ratkaisivat vähintään 4 tehtävää. Johdetaan ristiriita oletuksesta $k = 1$. Viisi tehtävää ratkaissut on voittaja. Nyt $N = 10 + 6(n-1) = 6n + 4$. Sanomme, että tehtäväpari on helppo, jos sen kummankin tehtävän ratkaisi yli $\frac{2n+1}{5}$ kilpailijaa. Jos helppoja tehtäväpareja olisi enemmän kuin yksi, olisi

$$N \geq 13 \cdot \frac{2n+2}{5} + 2\left(\frac{2n+1}{5} + 1\right) = 6n + 5.$$

Helppoja tehtäväpareja on siis enintään yksi. Jos helpon tehtäväparin tehtävät olisi ratkaissut yli $\frac{2n+1}{5} + 1$ kilpailijaa, olisi

$$N \geq 14 \cdot \frac{2n+1}{5} + \left(\frac{2n+1}{5} + 2\right) = 6n + 5.$$

Olkoon T_0 se tehtävä, jota 5 tehtävää ratkaissut ei osannut. Lasketaan parien (K, T_0) lukumäärä M. Tehtävä on mukana viidessä parissa, joista enintään yksi on helppo. Siis $M = 5 \cdot \frac{2n+1}{5} = 2n+1$ tai $M = 2n+2$. Jos T_0:n ratkaisi m kilpailijaa, niin kukin näistä ratkaisi kolme muuta tehtävää eli kolme paria, joissa T_0 on toinen osapuoli. Siis $M = 3m$. Siis joko $2n + 1 \equiv 0$ tai $2n + 1 \equiv -1 \mod 3$. Olkoon sitten $T_1 \neq T_0$, missä T_1 ei ole mahdollisen helpon tehtäväparin osapuoli. Olkoon L parien (K, T_1) lukumäärä. Silloin $L = 2n + 1$. Olkoon l niiden kilpailijoiden, jotka ratkaisivat T_1:n, mutta eivät viittä tehtävää, lukumäärä. Silloin $L = 4 + 3l$, koska voittaja ratkaisi T_1:n ja neljä muuta tehtävää, muut T_1:n ratkaisseet kolme muuta tehtävää. Mutta tämä merkitsee, että $2n + 1 \equiv 1 \mod 3$. Oletus $k = 1$ on kaikissa tapauksissa johtanut ristiriitaan, joten se on hylättävä. Siis $k \geq 2$.



K2006.1. Olkoon $\angle CAB = \alpha$, $\angle ABC = \beta$ ja $\angle BCA = \gamma$. Koska $\angle PBA + \angle PCA + \angle PBC + \angle PCB = \beta + \gamma$, on tehtävän ehdon perusteella $\angle PBC + \angle PCB = (\beta + \gamma)/2$, joten $\angle BPC = 180° - (\beta + \gamma)/2)$. Mutta selvästi myös $\angle BIC = 180° - (\beta + \gamma)/2$. Pisteet P ja I ovat siis samalla, pisteiden B ja C kautta kulkevalla ympyrän kaarella, eli piste P on kolmion BCI ympäri piirretyllä ympyrällä. Olkoon M kolmion ABC ympäri piirretyn ympyrän kaaren BC keskipiste. Silloin $MB = MC$. Kolmion ABI kulman vieruskulmana $\angle MIB = \alpha/2 + \beta/2$. Kehäkulmalauseen perusteella $\angle CBM = \alpha/2$. Siis $\angle IBM = \alpha/2 + \beta/2 = \angle MIB$. Kolmio MIB on siis tasakylkinen, $MI = MB$. Mutta tämä merkitsee, että M on kolmion BIC ympäri piirretyn ympyrän keskipiste. Kolmiosta APM saadaan nyt $AP + PM \geq AM = AI + IM = AI + PM$, joten $AP \geq AI$. Yhtäsuuruuden välttämätön ja riittävä ehto on, että P on janalla AM eli että $P = I$.

K2006.2. Sanomme tasakylkistä kolmiota, jossa on kaksi hyvää janaa sivuina, *tasahyväksi*. Tasahyviä kolmioita voi olla ainakin 1003: jos yhdistetään P:n joka toinen kärki lävistäjillä, syntyy 1003 tasahyvää kolmiota ja säännöllinen 1003-kulmio. Se voidaan jakaa mielivaltaisesti 1000:lla lävistäjällä kolmioiksi.

Osoitetaan sitten, että 1003 on suurin tasahyvien kolmioiden määrä. Osoitetaan induktiolla, että jos AB on jokin P:n halkaisija ja $\mathcal{L}$ lyhempi A:n ja B:n rajoittamista P:n piirin osista, ja että jos $\mathcal{L}$ koostuu n:stä P:n sivusta, niin sellaisia tasahyviä kolmioita, joiden kärjet ovat murtoviivan $\mathcal{L}$ kärkiä, on enintään $\frac{n}{2}$ kappaletta. Väitteen totuus on ilmeinen, jos $n = 2$ tai $n = 3$. Oletetaan, että se pätee kaikilla $n < k$ ja että $\mathcal{L}$ kosstuu k:sta P:n sivusta. Olkoon PQ pisin sellaisen tasahyvän kolmion sivu, jonka kärjet ovat murtoviivalla $\mathcal{L}$. (Jos tällaisia kolmioita ei ole, väite on ilmeinen.) Olkoon PQS kyseinen tasahyvä kolmio. Koska $\mathcal{L}$ on lyhempi murtoviivoista AB, kaikki kolmiot, joiden kärjet ovat $\mathcal{L}$:llä, ovat joko tylppä- tai suorakulmaisia. Tästä seuraa, että S on PQS:n huippu. Voimme olettaa, että A, P, S, Q ja B seuraavat toisiaan tässä järjestyksessä. Pisteet jakavat $\mathcal{L}$:n neljäksi murtoviivaksi $\mathcal{L}_{AP}$, $\mathcal{L}_{PS}$, $\mathcal{L}_{SQ}$ ja $\mathcal{L}_{QB}$, joista kaksi voi surkastua vain yhdeksi pisteeksi. Koska P:n jakoon käytetyt lävistäjät eivät leikkaa toisiaan P:n sisällä ja koska PQ oli pisin $\mathcal{L}$:ään sisältynyt tasahyvän kolmion sivu, kaikkien $\mathcal{L}$:n tasahyvien kolmioiden, paitsi PQS:n, kaikki kärjet ovat jossakin $\mathcal{L}$:n neljästä jako-osasta. Niihin voidaan soveltaa induktio-oletusta. Lisäksi PS ja PQ ovat hyviä janoja, joten sovellettaessa induktio-oletusta $\mathcal{L}_{PS}$:ään ja $\mathcal{L}_{SQ}$:hun jää epäyhtälön puolikkaiden eroksi parittomuuden takia kummassakin tapauksessa ainakin $\frac{1}{2}$. Nämä puolikkaat kattavat kolmion PQS, joten yhteen laskien väite pätee $\mathcal{L}$:ään.

Olkoon nyt XY pisin P:n jaossa käytetty lävistäjä ja $\mathcal{L}_{XY}$ lyhempi X:n ja Y:n rajaamista P:n piirin osista. Olkoon Z se jakoon kuuluvan kolmion XYZ kärki, joka ei ole murtoviivalla $\mathcal{L}_{XY}$. Kolmion XYZ kaikki kulmat ovat teräviä tai suoria: $\angle YZX$, koska $\mathcal{L}_{XY}$ on murtoviivoista P:n piiriin kuuluvista murtoviivoista $X \ldots Y$ lyhempi ja muut kaksi kulmaa siksi, että XY on kolmion XYZ pisin sivu. Määritellään kuten aikaisemmin murtoviivat $\mathcal{L}_{XZ}$ ja $\mathcal{L}_{ZY}$. Kaikkien tasahyvien kolmioiden kärkien, paitsi mahdollisesti XYZ:n, tulee kuulua tasan yhteen paloista $\mathcal{L}_{XY}$, $\mathcal{L}_{XZ}$ ja $\mathcal{L}_{ZY}$. Niihin voidaan soveltaa induktio-oletusta. Jos XYZ ei ole tasahyvä, todistus on valmis. Jos XYZ on tasahyvä, mainituissa paloissa on kaksi, joiden sivujen määrä on pariton, ja joille tasahyvien kolmioiden lukumäärän arvio ei ole tarkka. Kuten edellä, nämä epäyhtälöiden puolien erotukset, jotka ovat ainakin $\frac{1}{2}$, kattavat kolmion XYZ.

K2006.3. Tarkastellaan tehtävän epäyhtälön vasemmalla puolella itseisarvomerkkien välissä olevaa lauseketta a:n kolmannen asteen polynomina. Siinä kolmannen asteen termin kerroin on $b-c$. Jos $a=b$ tai $a=c$, polynomin arvo on 0. Myös $-(b+c)b((b+c)^2-b^2)+bc(b^2-c^2)-c(b+c)(c^2-(b+c)^2)=(b+c)(-2b^2c-bc^2+b^2c-bc^2+2bc^2+b^2c)=0$, joten $-(b+c)$ on polynomin kolmas nollakohta. Kyseinen polynomi on siis $(b-c)(a-b)(a-c)(a+b+c)$. Tehtävän epäyhtälö on

$$|(b-c)(a-b)(a-c)(a+b+c)| \le M(a^2+b^2+c^2)^2.$$

Epäyhtälö on symmetrinen, joten voimme olettaa, että $a \le b \le c$. Tällöin

$$|(a-b)(b-c)| = (b-a)(c-b) \le \left(\frac{(b-a)+(c-b)}{2}\right)^2 = \frac{(c-a)^2}{4}, \tag{1}$$

ja yhtäsuuruus on voimassa, kun $b-a=c-b$ eli kun $2b=a+c$. Lisäksi

$$\left(\frac{(c-b)+(b-a)}{2}\right)^2 \le \frac{(c-b)^2+(b-a)^2}{2}$$

eli

$$3(c-a)^2 \le 2\left((b-a)^2+(c-b)^2+(c-a)^2\right), \tag{2}$$

missä yhtäsuuruus on voimassa vain, kun $b-a=c-b$ eli $2b=a+c$. Kun (1) ja (2) yhdistetään ja käytetään aritmeettisen ja geometrisen keskiarvon välistä yhtälöä, saadaan

$$\begin{aligned}
|(b-c)(a-b)(a-c)(a+b+c)| &\le \frac{1}{4}|(c-a)^3(a+b+c)| = \frac{1}{4}\sqrt{(c-a)^6(a+b+c)^2} \\
&\le \frac{1}{4}\sqrt{\left(\frac{2\left((b-a)^2+(c-b)^2+(c-a)^2\right)}{3}\right)^3(a+b+c)^2} \\
&= \frac{\sqrt{2}}{2}\left(\sqrt[4]{\left(\frac{(b-a)^2+(c-b)^2+(c-a)^2}{3}\right)^3(a+b+c)^2}\right)^2 \\
&\le \frac{\sqrt{2}}{2}\left(\frac{(b-a)^2+(c-b)^2+(c-a)^2+(a+b+c)^2}{4}\right)^2 = \frac{9\sqrt{2}}{32}(a^2+b^2+c^2)^2.
\end{aligned}$$

Tehtävän epäyhtälö toteutuu siis, kun $M = \frac{9\sqrt{2}}{32}$, ja epäyhtälö on yhtälö, kun $2b=a+c$ ja

$$\frac{(b-a)^2+(c-b)^2+(c-a)^2}{3} = (a+b+c)^2.$$

Kun viimeiseen yhtälöön sijoitetaan $b = \dfrac{a+c}{2}$, se saa muodon $2(c-a)^2 = 9(a+c)^2$. Yhtäsuuruusehdot ovat siis $2b = a+c$ ja $(c-a)^2 = 18b^2$. jos $b = 1$, ehdot toteutuvat, kun $a = 1 - \dfrac{3}{2}\sqrt{2}$ ja $c = 1 + \dfrac{3}{2}\sqrt{2}$. Täten $M = \dfrac{9\sqrt{2}}{32}$ on todellakin pienin ehdon toteuttava M.

K2006.4. Todetaan, että yhtälöllä ei ole ratkaisuja (x, y), missä $x < 0$. Jos $x \le -2$, $2^x + 2^{2x+1}$ ei ole kokonaisluku, ja jos $x = -1$, yhtälön vasen puoli on 2, joka puolestaan ei ole kokonaisluvun neliö. Jos (x, y) on ratkaisu, niin myös $(x, -y)$ on ratkaisu. Selvästi $(0, 2)$ ja $(0, -2)$ ovat ratkaisuja. Voidaan olettaa, että $x \ge 1$ ja $y^2 \ge 11$ eli $y > 3$. y on pariton luku, joten $y \ge 5$. Yhtälö on yhtäpitävä yhtälön

$$2^x(2^{x+1} + 1) = (y-1)(y+1)$$

kanssa. Parillisista luvuista $y-1$ ja $y+1$ tasan toinen on jaollinen 4:llä. Jos tämä luku on $y-1$, niin $y = 2^{x-1}u + 1$, missä u on pariton luku. Siis $2^x(2^{x+1}+1) = 2^{2x-2}u^2 + 2^x u$ eli $2^{x-2}u^2 + u = 2^{x+1} + 1$. Tällöin $1 - u = 2^{x-2}(u^2 - 8)$. Siis $u^2 - 8 \le 0$, joka on mahdollista vain, kun $u = 1$. Ristiriita osoittaa, että $y - 1$ ei ole neljällä jaollinen. Jäljelle jää mahdollisuus $y + 1 = 2^{x-1}u$. Samoin kuin edellä saadaan nyt $1 + u = 2^{x-2}(u^2 - 8) \ge 2(u^2 - 8)$ eli $2u^2 - u - 17 \le 0$. Tästä seuraa $u \le 3$. $u = 1$ ei ole mahdollista. Sen sijaan $u = 3$ antaa ratkaisun $x = 4$ ja $y = 23$. Ainoat ratkaisut ovat siis $(0, \pm 2)$ ja $(4, \pm 23)$.

K2006.5 Jos jokainen ehdon $Q(x) = x$ toteuttava luku toteuttaa myös ehdon $P(x) = x$, väite on tosi, koska n:nnen asteen polynomilla $P(x) - x$ on enintään n nollakohtaa. Oletetaan siis, että on olemassa luku x_0, jolle $Q(x_0) = x_0$, mutta $P(x_0) \ne x_0$. Jos nyt $x_1 = P(x_0)$, $x_2 = P(x_1)$, $\ldots$, niin $x_k = P(x_{k-1}) = Q(x_0) = x_0$. Jos u ja v ovat mielivaltaisia kokonaislukuja, niin luku $P(u) - P(v)$ on jaollinen luvulla $u - v$ (koska $u^j - v^j$ on kaikilla j jaollinen $(u-v)$:llä). Näin ollen $x_{j+1} - x_j = P(x_j) - P(x_{j-1}$ on jaollinen $(x_j - x_{j-1})$:llä. Jonossa

$$x_0 - x_1, \quad x_1 - x_2, \quad \ldots, \quad x_{k-1} - x_k, \quad x_k - x_{k+1} = x_0 - x_1$$

jokainen jäsen on jaollinen edellisellä. Tämä on mahdollista vain, jos jonon kaikkien jäsenten itseisarvo on sama; itseisarvo ei ole 0, koska $x_1 \ne x_0$. Jos x_m on luvuista $x_0, \ldots, x_k$ pienin, niin on oltava $x_{m-1} - x_m = -(x_m - x_{m+1})$. Siis $x_{m-1} = x_{m+1}$, $x_{m+2} = P(x_{m+1}) = P(x_{m-1}) = x_m$ jne. Jono $x_0, x_1, \ldots, x_k$ on siis vuorotteleva ja koostuu vain kahdesta eri luvusta. Jokainen ehdon $Q(x) = x$ toteuttava luku toteuttaa myös ehdon $P(P(x)) = x$. On osoitettava, että tällaisia lukuja on enintään n kappaletta.

Olkoon nyt a ehdon $P(P(a)) = a$ toteuttava luku ja olkoon $b = P(a) \ne a$. Silloin $P(b) = a$. Olkoon vielä c jokin ehdon $P(P(c)) = c$ toteuttava luku ja $d = P(c)$, $c = P(d)$. (On mahdollista, että $c = d$.) Aikaisemmin esitetyn mukaan $c - a$ ja $d - b$ ovat toistensa tekijöitä samoin kuin $c - b$ ja $d - a$. Siis

$$c - b = \pm(d - a), \quad c - a = \pm(d - b).$$

Jos molemmissa edellisissä yhtälöissä olisi $+$-merkki, niistä seuraisi puolittain vähentämällä $a - b = b - a$ eli $a = b$. Koska $a \ne b$, on ainakin toisessa yhtälössä $-$-merkki. Tämä yhtälö olisi silloin $a + b = c + d$ eli $a + b - c - P(c) = 0$. Mutta tämä merkitsee, että jokainen yhtälön $P(P(x)) = x$ toteuttava luku toteuttaa yhtälön $a+b-x-P(x) = 0$ eli on n:nnen asteen polynomin $P(x) + x - a - b$ nollakohta (myös a ja b toteuttavat yhtälön). Näitä nollakohtia on enintään n kappaletta.

K2006.6. Osoitetaan ensin, että jos kuperan $2n$-kulmion Q ala on S, niin jokin Q:n sivu ja Q:n kärki muodostavat kolmion, jonka ala on ainakin $\frac{1}{n} \cdot S$. Sanomme niitä Q:n lävistäjiä, joiden päätepisteet jakavat Q:n piirin murtoviivoiksi, joissa on n sivua, Q:n *päälävistäjiksi.* Jos $b = AB$ on Q:n sivu, niin päälävistäjät AA' ja BB' leikkaavat pisteessä C. Merkitään kolmiota ABC symbolilla Δ_b. Väitämme, että kun b käy läpi kaikki $2n$-kulmion Q sivut, niin kolmiot Δ_b peittävät koko monikulmion Q. Jokainen jonkin päälävistäjän piste on jonkin kolmion Δ_b sivun piste. Olkoon X sellainen Q:n piste, joka ei ole millään päälävistäjällä. Tulkitaan päälävistäjät suunnatuiksi janoiksi ja oletetaan, että X on AA':n vasemmalla puolellla. Tarkastellaan päälävistäjiä AA', BB', CC', ..., missä A, B, C, ... ovat Q:n peräkkäiset kärjet A:sta lukien A:n oikealla puolella. Päälävistäjäjonon n:s jäsen on päälävistäja $A'A$, jonka oikealla puolella X on. Tästä seuraa, että Q:lla on sivu KL niin, että X on KK':n vasemmalla, mutta LL':n oikealla puolella. Mutta nyt X:n on oltava kolmiossa $\Delta_{K'L'}$. – Vastaava päättely toimii luonnollisesti myös, jos X on AA':n vasemmalla puolella. Kolmiot Δ_b peittävät siis koko Q:n. Tästä seuraa laatikkoperiaatteen nojalla, että on olemassa sivut $b = AB$ ja $b' = A'B'$ niin, että kolmioiden Δ_b ja $\Delta_{b'}$ yhteen laskettu ala on ainakin $\frac{1}{n}S$. Leikatkoot AA' ja BB' pisteessä Y. Oletetaan, että $BY \geq B'Y$. Silloin

$$|ABA'| = |ABY| + |YBA'| \geq |ABY| + |YA'B'| \geq \frac{1}{n}S.$$

Aputulos on todistettu.

Tarkastellaan nyt tehtävän n-kulmiota P. olkoot sen sivut b_1, b_2, ..., b_n ja olkoon S_i suurimman sellaisen P:hen sisältyvän kolmion, jonka yksi sivu on b_i, ala. Tehdään vastaoletus

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{S_i}{S} < 2.$$

Tällöin on olemassa rationaaliluvut q_i niin, että

$$q_i > \frac{S_i}{S}, \quad i = 1, \ldots, n, \quad \text{ja} \quad \sum_{i=1}^{n} q_i = 2.$$

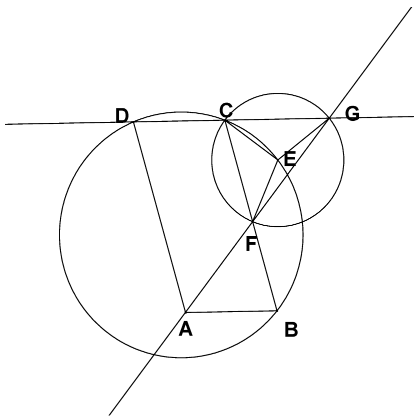
Kirjoitetaan $q_i = \frac{k_i}{m}$, missä m on murtolukujen q_i nimittäjien pienin yhteinen monikerta. Lukujen k_i summa on $2m$. Jaetaan nyt jokainen P:n sivu b_i k_i:hin yhtä suureen osaan. Syntyy kupera $2m$-kulmio Q (jonka jotkut kulmat ovat 180°). Aputuloksen mukaan Q:lla on sivu b ja kärki H, jotka muodostavat kolmion, jonka ala on $\geq \frac{1}{m}S$. b on erään P:n sivun b_i osa. Kolmion, jonka määrittävät b ja H, ala on $\geq k_i \cdot \frac{1}{n}S = q_iS > S_i$. Tämä on ristiriidassa luvun S_i määritelmän kanssa. Vastaoletus on siis väärä ja tehtävän väite todistettu.

K2007.1. Olkoon k jokin sellainen indeksi, jolle $d = d_k$. Olkoon k_1 ja $k_2 \geq k_1$ sellaiset indeksit, joille $d_k = a_{k_1} - a_{k_2}$. Jos $x_1 \leq x_2 \leq \ldots \leq x_n$, niin $x_{k_1} \leq x_{k_2}$. Jos $a_{k_1} - x_{k_1} \geq \dfrac{d}{2}$, niin $(*)$ pätee. Oletetaan, että $a_{k_1} - x_{k_1} \leq \dfrac{d}{2}$. Mutta silloin

$$x_{k_2} - a_{k_2} \geq x_{k_1} - a_{k_1} + d \geq -\frac{d}{2} + d = \frac{d}{2}.$$

Väite (a) on todistettu. Kohdassa (b) vaadittu jono voidaan rakentaa esimerkiksi seuraavasti. Olkoon $x_1 = a_1 - \dfrac{d}{2}$ ja olkoon x_k suurempi luvuista x_{k-1} ja $a_k - \dfrac{d}{2}$. Silloin $x_{k-1} \leq x_k$ kaikilla k. Olkoon m mielivaltainen indeksi. Jos $x_m = a_m - \dfrac{d}{2}$, niin $|x_m - a_m| \leq \dfrac{d}{2}$. Jos $x_m > a_m - \dfrac{d}{2}$, niin $x_m = x_{m-1}$. Olkoon nyt p pienin indeksi, jolle $x_m = x_p$. Silloin $x_p = a_p - \dfrac{d}{2}$ ja, koska $p < m$, $x_m - a_m = a_p - \dfrac{d}{2} - a_m \leq d - \dfrac{d}{2} = d$. Siis $|a_m - x_m| \leq \dfrac{d}{2}$. Nämä epäyhtälöt osoittavat, että epäyhtälössä $(*)$ vallitsee jonolle (x_k) yhtäsuuruus.

K2007.2. Riittää, että osoitetaan $CF = CG$, koska tällöin $\angle FAD = \angle FGC = \angle CFG = \angle BAF$. Tehdään vastaoletus $CF < GC$. Olkoot K ja L pisteen E kohtisuorat projektiot janoilla CF ja CG. Silloin $KF < CL$. Koska FC ja GC ovat E-keskisen ympyrän jänteitä, on $EL < EK$. Koska $BCED$ on jännenelikulmio, $\angle CBE = \angle CDE$. Suorakulmaiset kolmiot BEL ja DEK ovat yhdenmuotoiset, joten $DK > BL$. Näin ollen $DF = DK - KF > BL - CL = BC = AD$. Mutta tämä on ristiriidassa sen kanssa, että kolmiot ADF ja GCF ovat yhdenmuotoiset ja $CF < CG$. Ehdosta $CF > GC$ johdetaan ristiriita samoin.



2. ratkaisu (Suomen joukkueen jäsen Sebastian Dumitrescu). Kolmiot ABG, FCG ja FDA ovat yhdenmuotoisia. Koska $AD = BC$ ja $AB = DC$, saadaan

$$\frac{BC}{DF} = \frac{BG}{DC}. \tag{1}$$

Lasketaan pisteiden B ja D potenssi E-keskisen ja pisteet F, C ja G sisältävän ympyrän suhteen. Saadaan $BC \cdot BG = BE^2 - EC^2$ ja $DF \cdot DC = DE^2 - EF^2$. Kun yhtälöt jaetaan puolittain ja otetaan huomioon (1), saadaan

$$\frac{BC^2}{DF^2} = \frac{BE^2 - EC^2}{DE^2 - EF^2}. \tag{2}$$

Kosinilause sovellettuna kolmioihin EBC ja EDF antaa $BE^2 - EC^2 = BC(2 \cdot BE\cos(\angle CBE))$ ja $DE^2 - EF^2 = DF(2 \cdot DE\cos(\angle EDF) - DF)$. Sijoitetaan edelliset lausekkeet kaavaan (2), joka sievenee muotoon

$$\frac{BC}{DF} = \frac{2 \cdot BE \cdot \cos(\angle CBE) - BC}{2 \cdot DE \cdot \cos(\angle EDF) - DF}. \tag{3}$$

Mutta koska $BCED$ on jännenelikulmio, $\angle EDF = \angle EDC = \angle CBE$. (3) sievenee siten muotoon

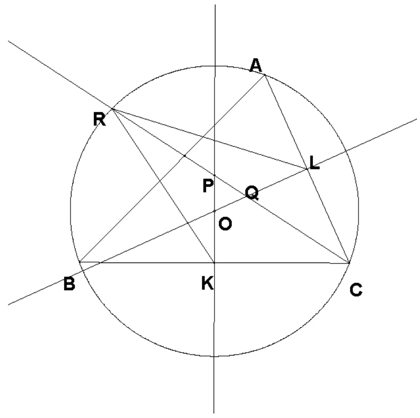
$$\frac{BC}{DF} = \frac{BE}{DE}.$$

Tästä ja juuri havaitusta kulmien yhtäsuuruudesta seuraa, että kolmiot BCE ja DFE ovat yhdenmuotoiset. Koska kolmioissa on yhtä pitkät sivut EF ja EC, kolmiot ovat yhtenevät. Siis $DF = BC = AD$, joten $\angle DAF = \angle DFA = \angle FAB$.

K2007.3. Merkitään $|E|$:lla joukon E alkioiden lukumäärää. Merkitään huoneissa olevien kilpailijoiden joukkoja symboleilla A ja B ja merkitään vastaavasti huoneessa olevan suurikokoisimman klikin kokoa $c(A)$:lla ja $c(B)$:llä. Olkoon M jokin klikki, jonka koko on suurin mahdollinen. Olkoon $|M| = 2m$. Sijoitetaan aluksi kaikki M:n jäsenet huoneeseen A ja kaikki muut kilpailijat huoneeseen B. Silloin $c(A) = |M| \geq c(B)$. Jos $c(A) = c(B)$, vaadittu sijoittelu on tehty. Jos $c(A) > c(B)$, siirretään yksi henkilö huoneesta A huoneeseen B. Tällöin $c(A)$ pienenee yhdellä ja $c(B)$ joko säilyy ennallaan tai kasvaa yhdellä. Jatketaan siirtoja, kunnes $c(A) \leq c(B) \leq c(A) + 1$. Tällöin $c(A) = |A| \geq m$. Merkitään $c(A) = k$. Jos nyt $c(A) = c(B)$, jako on valmis. Oletetaan, että $c(B) = c(A) + 1$. Jos nyt B-huoneessa on kilpailija $x \in M$ ja klikki C, jolle $|C| = k + 1$ ja $x \notin C$, niin siirretään x huoneeseen A. Silloin $c(A) = k + 1 = |C| = c(B)$, ja jako on suoritettu. Ellei tällaista kilpailijaa ole, niin jokainen $x \in B \cap M$ kuuluu jokaiseen sellaiseen klikkiin $C \subset B$, jolle $|C| = k + 1$. Valitaan nyt jokin tällainen klikki ja siirretään siitä yksi kilpailija, joka ei kuulu M:ään, A-huoneeseen. Toistetaan askel niin monta kertaa kuin se on mahdollista. Joka siirrossa $c(B)$ pienenee enintään yhdellä. Viimeisen mahdollisen siirron jälkeen $c(B) = k$. Tarkastellaan nyt tilannetta. A:ssa on yhä klikki $A \cap M$, joten $c(A) \geq k$. Olkoon Q mielivaltainen A:n klikki. Jos $x \in Q$, niin joko $x \in A \cap M$, jolloin x on jokaisen $B \cap M$:n jäsenen ystävä, tai x on siirretty sellaisesta B:n klikistä, joka sisälsi $B \cap M$:n, jolloin x myös on jokaisen $B \cap M$:n jäsenen ystävä. Siis $Q \cup (B \cap M)$ on klikki. Mutta M on suurikokoisin klikki, joten $|M| \geq |Q \cup (B \cap M)| = |Q| + |B \cap M| = |Q| + |M| - |A \cap M|$. Siis $|Q| \leq |A \cap M| = k$. Siis $c(A) \leq k$. Siis $c(A) = k$, ja haluttu jako on suoritettu.

K2007.4. Olkoon $\angle BCA = 2\gamma$. Kolmion RPK sivua RP vastaan piirretyn korkeusjanan pituus on $KC \cdot \sin\gamma$ ja kolmion RQL sivua RQ vastaan piirretyn korkeusjanan pituus on $LC \cdot \sin\gamma$. Väite tulee todistetuksi, jos saadaan osoitettua $RP \cdot KC = RQ \cdot LC$. Olkoon O kolmion ympäri piirretyn ympyrän keskipiste eli keskinormaalien leikkauspiste.

Suorakulmaisista kolmioista CPK ja CQL nähdään heti, että $\angle KPC = \angle LQC = \angle OQP$. Kolmio OQP on siis tasakylkinen. (Jos $Q = P = O$, tehtävän väite pätee triviaalisti.) Tästä seuraa, että pisteillä P ja Q on sama potenssi kolmion ABC ympäri piirretyn ympyrän suhteen ja edelleen, että $RP \cdot PC = CQ \cdot QR$. Tämä on mahdollista vain, jos $RP = QC$ ja $RQ = PC$. Mutta yhdenmuotoisista kolmioista PKC ja QLC saadaan



$$\frac{QC}{LC} = \frac{PC}{KC},$$

joten väite on tosi.

K2007.5. Tehdään vastaoletus: oletetaan, että on olemassa vastaesimerkkipari $(a,\, b)$, niin että $a \neq b$ ja $4ab-1$ on luvun $(4a^2-1)^2$ tekijä. Koska $4ab \equiv 1 \bmod (4ab-1)$, niin $(4ab)^2 \equiv 1 \bmod (4ab-1)$ ja $(4b^2-1)^2 \equiv (4b^2-(4ab)^2) = 16b^2(4a^2-1) \equiv 0 \bmod (4ab-1)$. Siis myös pari $(b,\, a)$ on vastaesimerkkipari. Voidaan siis olettaa, että on olemassa vastaesimerkkipari $(a,\, b)$ niin, että $a < b$. Olkoon nyt

$$r = \frac{4a^2-1}{4ab-1}.$$

Silloin

$$r \equiv (-r)(-1) \equiv (-r)(4ab-1) \equiv -(4a^2-1)^2 \equiv -1 \bmod (4a).$$

Siis $r = 4ac-1$ jollain positiivisella kokonaisluvulla c. Mutta r on luvun $4a^2-1$ aito tekijä, joten $r < 4a^2-1$. Siis $c < a$. Tämä merkitsee, että $(a,\, c)$ on myös vastaesimerkkipari ja $c < a$. Tarkastellaan nyt kaikkia vastaesimerkkipareja. Jollakin parilla $(a,\, b)$ lauseke $2a+b$ saa pienimmän mahdollisen arvonsa. Jos $a > b$, niin $2b+a < 2a+b$. Kuitenkin myös $(b,\, a)$ on vastaesimerkkipari. Jos $a < b$, on olemassa vastaesimerkkipari $(a,\, c)$, jolle $c < a$. Selvästi $2a+c < 2a+b$. Kummassakin tapauksessa tullaan ristiriitaan $2a+b$:n minimaalisuuden kanssa. Vastaesimerkkipareja ei siis voi olla olemassa.

K2007.6. Tasot, joiden yhtälöt ovat $x+y+z=k$, $k=1,\,\ldots,\,3n$, sisältävät kaikki S:n pisteet, mutta $(0,\,0,\,0)$ ei kuulu mihinkään niistä. Näitä tasoja on $3n$ kappaletta. Osoitetaan, että vähemmillä tasoilla peitto ei onnistu. Jos peittävien tasoja on m kappaletta ja niiden yhtälöt ovat $T_k(x,\,y,\,z) = a_kx + b_ky + c_kz - 1 = 0$, $k=1,\,\ldots,\,m$, niin polynomi

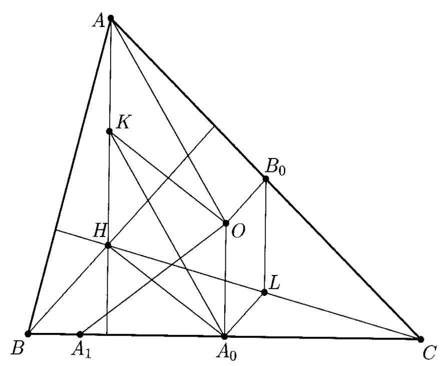
$$P(x,\,y,\,z) = \prod_{k=1}^{m} T_k(x,\,y,\,z)$$

saa arvon 0 aina kun $(x,\,y,\,z) \in S$, mutta $P(0,\,0,\,0) = (-1)^m \neq 0$. Polynomin aste on m. Osoitetaan, että $m \geq 3n$.

Tarkastellaan ensin kahden muuttujan polynomia $P(x,\, y)$, jolle $P(x,\, y) = 0$, kun x tai y on jokin luvuista $0,\, 1,\, \ldots,\, n$, mutta $(x,\, y) \neq (0,\, 0)$, ja jolle $P(0,\, 0) \neq 0$. Olkoon $S(y) = y(y-1)(y-2)\cdots(y-n)$ ja olkoon $R(x,\, y)$ polynomi, joka saadaan jakojäännökseksi, kun $P(x,\, y)$ jaetaan $S(y)$:llä: $P(x,\, y) = Q(x,\, y)S(y) + R(x,\, y)$. Nyt $R(x,\, y)$:n aste y:n suhteen on $<$ $S(y)$:n aste. Lisäksi $R(x,\, y) = P(x,\, y)$, kun $x,\, y \in \{0,\, 1,\, \ldots,\, n\}$. Siis $R(x,\, y) = R_n(x)y^n + R_{n-1}(x)y^{n-1} + \cdots + R_0(x)$. Polynomi $R(0,\, y)$ saa arvon 0, kun $y = 1,\, \ldots,\, n$, mutta $R(0,\, 0) \neq 0$. Siis $R(0,\, y)$:n aste on $\geq n$. Tästä seuraa, että $R_n(0) \neq 0$. Olkoon sitten $x \in \{1,\, \ldots,\, n\}$. y:n n:nnen asteen polynomi $R(x,\, y) = 0$, kun $y = 0,\, 1,\, \ldots,\, n$, joten polynomi on identtisesti 0. Siis myös $R_n(x) = 0$, kun $x \in \{1,\, \ldots,\, n\}$. Koska $R_n(x)$ ei ole nollapolynomi, sen asteen on oltava $\geq n$. Mutta tämä merkitsee, että $R(x,\, y)$:n ja siis myös $P(x,\, y)$:n aste kahden muuttujan polynomina on $\geq 2n$.

Nyt todistetun perusteella voidaan osoittaa, että kolmen muuttujan polynomin $P(x,\, y,\, z)$, jolle $P(x,\, y,\, z) = 0$, kun $(x,\, y,\, z) \in S$, mutta $P(0,\, 0,\, 0) \neq 0$, aste on $\geq 3n$. Päättely on aivan sama kuin edellä (ja voitaisiin kiteyttää induktioaskeleeksi). Muodostetaan $P(x,\, y,\, z)$:n jakojäännös $R(x,\, y,\, z)$ modulo $S(z) = z(z-1)\cdots(z-n)$. R:n aste z.n suhteen on $\leq n$ ja R saa saman arvon kuin P kaikissa niissä pisteissä $(x,\, y,\, z)$, joissa $x,\, y,\, z \in \{0,\, 1,\, \ldots,\, n\}$. Jos kirjoitetaan $R(x,\, y,\, z) = R_n(x,\, y)z^n + \cdots + R_0(x,\, y)$, niin $R(0,\, 0,\, z)$ ei ole nollapolynomi, mutta kuitenkin polynomi, jolla on ainakin n nollakohtaa; siis $R_n(0,\, 0) \neq 0$. Jos $(x,\, y) \neq (0,\, 0)$, mutta $x,\, y \in \{0,\, 1,\, \ldots,\, n\}$, niin $R(x,\, y,\, z)$ on z:n n:nnen asteen polynomi, jolla on $n+1$ nollakohtaa. Se on siis identtisesti nolla, joten $R_n(x,\, y) = 0$. Mutta aikaisemmin todistetun perusteella $R_n(x,\, y)$:n on oltava ainakin astetta $2n$. Siis $R(x,\, y,\, z)$ ja myös $P(x,\, y,\, z)$ on kolmen muuttujan polynomina ainakin astetta $3n$. Ratkaisu on valmis.

K2008.1 Olkoon A_0 sivun BC keskipiste ja B_0 sivun AC keskipiste. Ainoa piste, joka voi olla tehtävässä vaaditun ympyrän keskipiste, on janojen A_1A_2, B_1B_2 ja C_1C_2 keskinormaalien leikkauspiste. Sanotut keskinormaalit ovat myös kolmion sivujen keskinormaaleja, ja ne leikkaavat kolmion ympäri piirretyn ympyrän keskipisteessä O. Olkoon kolmion ABC ympäri piirretyn ympyrän säde R. Koska $A_0H = A_0A_1$, Pythagoraan lauseesta saadaan



$$OA_1^2 = OA_0^2 + A_0A_1^2 = OA_0^2 + A_0H^2. \tag{1}$$

Olkoot K ja L janojen AH ja CH keskipisteet. Kolmioista BCH ja CAH saadaan $A_0L \| BH$ ja $B_0L \| AH$. Koska $BH \perp AC$ ja $OB_0 \perp AC$, niin $A_0L \| OB_0$. Vastaavasti $B_0L \| OA_0$. Nelikulmio A_0LB_0O on siis suunnikas, joten $OA_0 = B_0L = KH$. Koska $KH \| OA_0$, HA_0OK on suunnikas. Samoin KA_0OA on suunnikas. Siis $A_0K = OA = R$. Sovelletaan suunnikaslausetta suunnikkaaseen HA_0OK; saadaan

$$2(OA_0^2 + A_0H^2) = OH^2 + A_0K^2 = OH^2 + R^2. \tag{2}$$

Yhtälöistä (1) ja (2) saadaan heti $OA_1^2 = \dfrac{1}{2}(OH^2 + R^2)$. Tiedetään, että $OA_1 = OA_2$.

Toisaalta sama lasku antaa saman arvon suureille OB_1^2 ja OC_1^2 ja $OB_1 = OB_2$, $OC_1 = OC_2$. Kysytyt pisteet ovat siis kaikki samalla O-keskisellä ympyrällä.

K2008.2. (a) Tehdään muuttujanvaihto

$$\frac{x}{x-1} = a, \quad \frac{y}{y-1} = b, \quad \frac{z}{z-1} = c$$

eli

$$x = \frac{a}{a-1}, \quad y = \frac{b}{b-1}, \quad z = \frac{c}{c-1}.$$

On siis todistettava, että $a^2 + b^2 + c^2 \geq 1$, kun $abc = (a-1)(b-1)(c-1)$, kun a, b, $c \neq 1$. Mutta viimeinen yhtälö on yhtäpitävä yhtälöiden

$$\begin{aligned} a + b + c - 1 &= ab + bc + ca, \\ 2(a + b + c - 1) &= (a + b + c)^2 - (a^2 + b^2 + c^2), \\ a^2 + b^2 + c^2 - 2 &= (a + b + c)^2 - 2(a + b + c), \\ a^2 + b^2 + c^2 - 1 &= (a + b + c - 1)^2 \geq 0. \end{aligned}$$

Väite on siis tosi.

(b) Edellisen yhtälöketjun viimeinen yhtälö osoittaa, että alkuperäisessä yhtälössä vallitsee yhtäsuuruus jos ja vain jos $a^2 + b^2 + c^2 = a + b + c = 1$. Koska $a^2 + b^2 + c^2 = (a + b + c)^2 - 2(ab + bc + ca)$, yhtäsuuruuden ehto on yhtälöiden $a + b + c = 1$ ja $ab + bc + ca = 0$ yhtäaikainen voimassaolo, sekä a, b, $c \neq 1$. Kun yhtälöistä eliminoidaan c, saadaan $a^2 + ab + b^2 = a + b$. Tulkitaan tämä b:n toisen asteen yhtälöksi. Yhtälön diskriminantti on $D = (a-1)^2 - 4a(a-1) = (1-a)(1+3a)$. Saamme rationaalisia ratkaisuja, jos valitsemme a:n niin, että $1-a$ ja $1+3a$ ovat rationaaliluvun neliöitä; tällöin diskriminantti ja b ovat myös rationaalisia ja samoin $c = 1 - a - b$. Asetetaan $a = \dfrac{k}{m}$, missä k ja m ovat kokonaislukuja. Jos $m = k^2 - k + 1$, niin $m - k = (k-1)^2$ ja $m + 3k = (k+1)^2$. Tällöin $D = \dfrac{(k^2-1)^2}{m^2}$, $b = \dfrac{1}{2m}(m - k \pm (k^2 - 1))$ ja $c = \dfrac{1-k}{m}$. Kun $k \neq 1$, niin a, b, $c \neq 1$. Kun k käy läpi luonnolliset luvut > 1, saadaan tällä tavoin äärettömän monta yhtälön $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ toteuttavaa rationaalilukukolmikkoa (a, b, c) ja samoin äärettömän monta tehtävän yhtälön toteuttavaa rationaalilukukolmikkoa (x, y, z).

K2008.3. Tarkastellaan kokonaislukua $k \geq 20$. Olkoon p jokin luvun $(k!)^2 + 1$ alkutekijä. Silloin $p > 20$ ja luvuilla p ja $k!$ ei ole yhteisiä tekijöitä. Olkoon $x \equiv k! \bmod p$ ja $0 < x < p$. Jos $p/2 > x$, niin $p - x < p/2$ ja $p - x \equiv -k! \bmod p$. Joka tapauksessa on olemassa n, $0 < n < p/2$ niin, että $n^2 \equiv (k!)^2 \equiv -1 \bmod p$. p on siis luvun $n^2 + 1$ tekijä. Tästä seuraa edelleen $(p - 2n)^2 = p^2 - 4pn + 4n^2 \equiv 4n^2 \equiv -4 \bmod p$. Siis $(p - 2n)^2 \geq p - 4$ eli $p \geq 2n + \sqrt{p-4} > 2n + \sqrt{2n}$, jos $p > 20$, sillä tällöin $p - 4 \geq 2n + \sqrt{p-4} - 4 > 2n$. On vielä osoitettava, että ehdon täyttäviä lukuja n on äärettömän monta. Olkoon n ja p edellä tuotetut luvut. Olkoon q jokin luvun $(p^2)! + 1$ alkutekijä. Samoin kuin edellä löydetään n', $n' < q/2$, niin että q on $n'^2 + 1$:n tekijä ja $q > 2n' + \sqrt{2n'}$. Toisaalta $n'^2 + 1 > q > p^2 > 4n^2 > n^2 + 1$, joten $n' > n$. Jokaista ehdon täyttävää kokonaislukua kohden löytyy siis suurempi ehdon täyttävä kokonaisluku, joten ehdon täyttäviä kokonaislukuja on äärettömän monta.

K2008.4. Olkoon f jokin ehdon toteuttava funktio. Asettamalla $w = x = y = z = 1$ saadaan

$$\frac{2f(1)^2}{2f(1)} = 1,$$

josta seuraa $f(1) = 1$. Olkoon sitten $w > 0$, $x = 1$, $y = z = \sqrt{w}$. Nyt

$$\frac{f(w)^2 + 1}{2f(w)} = \frac{w^2 + 1}{2w}.$$

Yhtälö sievenee muotoon

$$(wf(w) - 1)(f(w) - w) = 0.$$

Siis joko $f(w) = w$ tai $f(w) = \dfrac{1}{w}$. On ilmeistä, että funktiot $f(x) = x$ ja $f(x) = \dfrac{1}{x}$ (kaikilla $x > 0$) toteuttavat yhtälön. Osoitetaan, että muita yhtälön toteuttavia funktioita ei ole. Tehdään vastaoletus, jonka mukaan tällainen funktio f olisi olemassa. Silloin olisi olemassa positiiviset luvut a ja b, a, $b \neq 1$, niin että $f(a) = \dfrac{1}{a}$ ja $f(b) = b$. Asetetaan $w = a$, $x = b$, $y = z = \sqrt{ab}$. Saadaan

$$\frac{\dfrac{1}{a^2} + b^2}{2f(ab)} = \frac{a^2 + b^2}{2ab}$$

eli

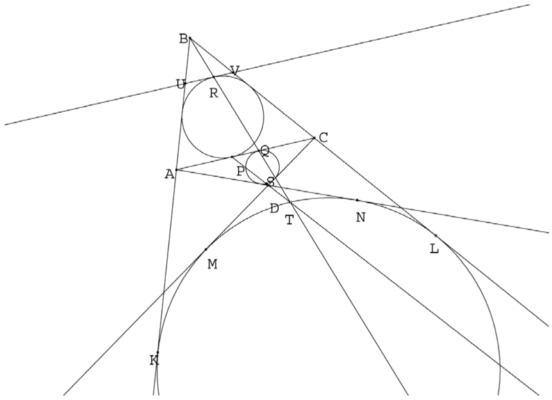
$$f(ab) = \frac{ab(a^{-2} + b^2)}{a^2 + b^2}.$$

Mutta $f(ab)$ on joko ab tai $\dfrac{1}{ab}$. Edellisessä tapauksessa on oltava $a^{-2} = a^2$ eli $a = 1$. Jälkimmäisessä tapauksessa $a^2b^2(a^{-2} + b^2) = a^2 + b^2$, josta seuraa $b = 1$. Kumpikin vaihtoehto johti ristiriitaan, joten vastaoletus on väärä.

K2008.5. Sanomme, että jono, jolla päästään alkutilasta tehtävän lopputilaan, on sallittu jono, ja sallittu jono, jolla päästään lopputilaan niin, että minkään lampun $n + 1, \ldots, 2n$ tilaa ei muuteta, on rajoitettu jono. Rajoitettuja jonoja on olemassa, koska on mahdollista sytyttää kukin lampuista $1, \ldots, n$ ja sen jälkeen sytyttää ja sammuttaa lamppua 1 $\dfrac{1}{2}(k-n)$ kertaa. Tarkastellaan nyt mielivaltaista rajoitettua jonoa X ja mielivaltaista lamppua p, $1 \leq p \leq n$. Oletetaan, että jonossa tämän lampun tilaa on muutettu k_p kertaa; k_p on pariton. Valitaan mielivaltainen parillinen määrä jonon sellaisia askelia, joissa lampun p tilaa vaihdetaan ja korvataan jokainen askeleella, jossa lampun $n+p$ tilaa vaihdetaan. Täten saadaan 2^{k_p-1} jonoa, joiden askeleet yhtyvät jonon X askeliin muuten kuin valittujen p:n tilaa muuttavien askelten kohdalla. (k_p-alkioisella joukolla on 2^{k_p-1} parillisalkioista osajoukkoa.) Samalla tavalla voidaan jokaiseen lamppuun $1, \ldots, n$ liittyvät tilanvaihdot siirtää lampun $n + 1, \ldots 2n$ tilanvaihdoiksi. Rajoitettuun jonoon X liittyy tällä tavoin $2^{k_1-1} \cdot 2^{k_2-1} \cdots 2^{k_n-1} = 2^{k-n}$ erilaista sallittua jonoa.

Osoitetaan kääntäen, että jokainen sallittu jono Y saadaan rajoitetusta jonosta kuvatulla tavalla: korvataan jokainen lampun $q > n$ tilan muuttava Y:n askel lampun $q - n$ tilan muuttavalla askeleella. Näin saadaan eräs rajoitettu jono X. Koska jonossa Y lamppujen $q > n$ tilaa on muutettu parillinen määrä kertoja, jonon Y ja jonon X lopputilat ovat samat. Selvästi Y saadaan X:stä edellä kuvatulla menetelmällä. Jokaista rajoitettua jonoa kohden on siis tasan 2^{k-n} samaan lopputilaan johtavaa sallittua jonoa. Siis $N/M = 2^{k-n}$.

K2008.6. Väitteen todistamiseksi riittää osoittaa, että ympyröiden ω_1 ja ω_2 välisen homotetiakuvauksen homotetiakeskus on ympyrällä ω. Osoitetaan ensin, että ympyrän ω olemassa olo asettaa rajoituksen nelikulmion $ABCD$ muodolle. Olkoot ympyrän ω ja suorien BA, BC, CD ja AD sivuamispisteet K. L, M ja N. Nyt $AB + AD = (BK - AK) + (AN - DN) = BL - AN + AN - DM = BL - (CM - CD) = BL - CL + CD = BC + CD$.



Olkoon nyt P ympyrän ω_1 ja sivun AC yhteinen piste; olkoon R ympyrän ω_1 P:n kautta piirretyn halkaisijan toinen päätepiste ja Q BR:n ja AC:n leikkauspiste. Olkoot vielä U ja V R:n kautta piirretyn ω_1:n tangentin ja suorien BA ja BC leikkauspisteet. B-keskinen homotetia, joka kuvaa UV:n janaksi AC, kuvaa ympyrän ω_1, joka on kolmion BUV sivuun UV liittyvä sivuympyrä, kolmion BAC sivuun AC liittyväksi sivuympyräksi. Q on näin ollen viimemainitun sivuympyrän ja sivun AC yhteinen piste. On helppo nähdä (ja tunnettua), että kolmion XYZ sisään piirretyn ympyrän sivuamispisteen etäisyys kolmion kärjestä X on sama kuin sivuun XY liittyvän sivuympyrän sivuamispisteen etäisyys kärjestä Y. Näin ollen $AP = CQ$.

Kolmion sisään piirretyn ympyrän sivuamispisteen ja kolmion kärjen etäisyys on laskettavissa tunnetun (ja helposti johdettavan) kaavan avulla. Sen mukaan $AP = \frac{1}{2}(AB + AC - BC)$. Vastaavasti kolmion ADC sisään piirretyn ympyrän ja sivun AC yhteiselle pisteelle Q' saadaan $CQ' = \frac{1}{2}(AC + CD - AD)$. Koska edellä sanotun mukaan tehtävän nelikulmiolle pätee $AB - BC = CD - AD$, on $CQ' = AP = CQ$. Q on siis ympyrän ω_2 ja suoran AC yhteinen piste. Vastaavalla tavalla nähdään, että ympyrän ω_2 pisteeseen Q piirretyn halkaisijan toinen päätepiste S , D ja P ovat samalla suoralla.

Olkoon sitten T ympyrän ω AC:n suuntaisen tangentin sivuamispiste (tarkemmin sanoen se niistä, joka on lähempänä suoraa AC). Homotetia, jonka keskus on B ja homotetiasuhde $\frac{BT}{PR}$ kuvaa ympyrän ω_1 ympyräksi ω. B, R, Q ja T ovat siis samalla suoralla. Vastaavasti homotetia, jonka keskus on D ja homotetiasuhde $-\frac{DT}{DS}$ kuvaa ympyrän ω_2 ympyräksi ω. P, S, D ja T ovat siis samalla suoralla. Mutta koska ympyröiden ω_1 ja ω_2 halkaisijat PR ja SQ ovat yhdensuuntaiset, ne kuvautuvat toisilleen T-keskisessä homotetiassa. Tästä seuraa, että itse ympyrät ω_1 ja ω_2 kuvautuvat toisilleen tässä homotetiassa. Mutta tällöin T:n on oltava ympyröiden yhteisten ulkopuolisten tangenttien leikkauspiste, ja todistus on valmis.

K2009.1. Tehtävän oletuksen perusteella

$$a_i a_{i+1} \equiv a_i \bmod n,$$

kun $i = 1, 2, \ldots, k-1$. Siis

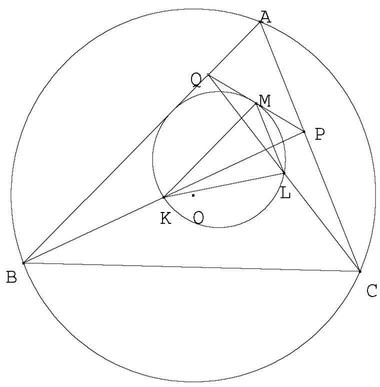
$$a_1 \cdots a_{k-1} a_k \equiv a_1 \cdots a_{k-1} \equiv \cdots \equiv a_1 \bmod n.$$

Tehdään vastaoletus $a_k a_1 \equiv a_k \bmod n$. Silloin

$$a_1 \equiv a_1 \cdots a_{k-1} a_k = a_k a_1 \cdots a_{k-1} \equiv a_k a_1 \cdots a_{k-2} \equiv \cdots \equiv a_k a_1 \equiv a_k \bmod n.$$

Mutta $a_1, a_k \in \{1, 2, \ldots, n\}$, joten on oltava $a_1 = a_k$. Oletuksen mukaan a_1 ja a_k ovat eri lukuja. Vastaoletus johti ristiriitaan, joten se on väärä.

K2009.2. Koska M ja L ovat kolmion CQP sivujen keskipisteet, $ML \| PC$. Siis $\angle LMP = \angle MPA$. Koska QP on ympyrän Γ tangentti, $\angle LMP = \angle MKL$. Siis $\angle MKL = \angle QPA$. Vastaavasti osoitetaan, että $\angle MLK = \angle AQP$. Kolmiot AQP ja MLK ovat siis yhdenmuotoiset. Siis



$$\frac{AP}{AQ} = \frac{MK}{ML} = \frac{QB}{PC}.$$

Mutta tämä merkitsee, että $AP \cdot PC = AQ \cdot QB$. Pisteiden P ja Q potenssit kolmion ABC ympäri piirretyn ympyrän suhteen on siis samat. Molemmat pisteet ovat näin ollen samalla etäisyydellä ympyrän keskipisteestä O.

K2009.3. Olkoon aritmeettisen jonon (s_{s_n}) peräkkäisten termien erotus D. Merkitään $d_n = s_{n+1} - s_n$. Osoitetaan, että d_n on vakio. Osoitetaan ensin, että luvut d_n ovat rajoitettuja. Koska (s_n) on kasvava kokonaislukujono, $d_n \geq 1$ kaikilla n. Siis

$$d_n = s_{n+1} - s_n \leq d_{s_n} + d_{s_n+1} + \cdots + d_{s_{n+1}-1} = s_{s_{n+1}} - s_{s_n} = D.$$

Siitä, että jono (d_n) on rajoitettu, seuraa, että on olemassa

$$m = \min\{d_n \mid n = 1, 2, \ldots\}, \quad M = \max\{d_n \mid n = 1, 2, \ldots\}.$$

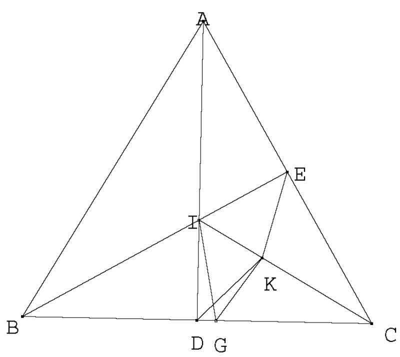
Väite tulee todistetuksi, jos osoitetaan, että $m = M$. Tehdään vastaoletus $m < M$. Jollain n on $m = d_n = s_{n+1} - s_n$. Nyt

$$D = s_{s_{n+1}} - s_{s_n} = s_{s_n+m} - s_{s_n} = d_{s_n} + d_{s_n+1} + \cdots + d_{s_n+m-1} \leq nM, \qquad (1)$$

koska summassa on m termiä ja niistä jokainen on $\leq M$. Jollain n' on $d_{n'} = M$. Samoin kuin edellä saadaan

$$D = s_{s_{n'}+M} - s_{s_{n'}} = d_{s_{n'}} + d_{s_{n'}+1} + \cdots + d_{s_{n'}+M-1} \geq Mm. \tag{2}$$

Siis $D = mM$ ja jos $d_n = m$, niin $d_{s_n} = d_{s_n+1} = \cdots = d_{s_{n+1}-1} = M$ ja vastaavasti jos $d_n = M$, niin $d_{s_n} = d_{s_n+1} = \cdots = d_{s_{n+1}-1} = m$. Kaikille n pätee $s_n \geq s_1 + (n-1) \geq n$. Jos $d_n = m$, on oltava $s_n > n$. Jos nimittäin olisi $s_n = n$, olisi $m = d_n = d_{s_n} = M$, mikä olisi ristiriidassa oletuksen $m < M$ kanssa. Samoin, jos $d_n = M$, niin $d_{s_n} = m$ ja $s_n > n$. On siis olemassa aidosti kasvava jono $n_1, n_2, \ldots$, jolle $d_{s_{n_1}} = M$, $d_{s_{n_2}} = m$, $d_{s_{n_3}} = M$, $d_{s_{n_4}} = m$ jne. Mutta jono $d_{s_1}, d_{s_2}, \ldots$ on aritmeettisten jonojen $s_{s_1+1}, s_{s_2}, \ldots$ ja $s_{s_1+1}, s_{s_2+1}, \ldots$ termien erotusjono ja siis myös aritmeettinen jono. Sillä voi olla ei-kasvava ja ei-vähenevä osajono vain, jos se on vakiojono. Ei siis voi olla $m < M$, ja todistus on valmis.



K2009.4. Olkoon I kolmion ABC sisään piirretyn ympyrän keskipiste. Koska kolmio ABC on tasakylkinen, $AD \perp BC$. Siis $\angle IDK = 45°$. Olkoon G pisteen E peilikuva peilauksessa yli suoran CI. Koska CI on kulman BCA puolittaja, G on puolisuoralla CB. Jos $G = D$, jana EI on peilautunut janaksi DI, joten $\angle IEC = 90°$. Mutta silloin kolmion ABC B:stä piirretyt korkeusjana ja kulmanpuolittaja yhtyvät, ja $BC = BA$. Kolmio on tasasivuinen ja $\angle BAC = 60°$. Oletetaan sitten, että $G \neq D$ ja että G on D:n ja C:n välissä. Nyt $\angle IGK = \angle IEK = \angle BEK$. Jos $\angle BEK = 45°$, niin $\angle IGK = \angle IDK$. Pisteet I, D, G ja K ovat samalla ympyrällä. Tällöin $\angle EIK = \angle GIK = \angle GDK = 45°$, $\angle BIC = 180° - \angle EIK = 135°$, $2 \cdot \angle BCI = 45°$, $2 \cdot \angle BCA = 90°$ ja $\angle BAC = 90°$. Jos G olisi B:n ja D:n välissä, olisi samoin $\angle EIK = \angle GIK = 180° - \angle GDK = 180° - 135° = 45°$, ja saataisiin $\angle BAC = 90°$. (Voidaan kuitenkin helposti osoittaa, että G ei voi olla janalla BD.) Kulman $\angle BAC$ ainoat mahdolliset arvot ovat siis $60°$ ja $90°$. On vielä varmimstettava, että näillä arvoilla todellakin $\angle BEK = 45°$. Olkoon $\angle BAC = 60°$. Silloin $BE \perp AC$ ja peilaus yli IC:n kuvaa D:n E:lle. Koska $\angle IDK = 45°$, on $\angle IEK = 45°$. Olkoon $\angle BAC = 90°$. Silloin $\angle AIE = \angle BID = \angle BEA = 90° - 22{,}5°$ ja $\angle EIK = 180° - 2 \cdot \angle BID = 45°$. Kolmio AIE on tasakylkinen, joten peilauksessa yli AK:n I ja E vastaavat toisiaan. Siis $\angle IEK = \angle EIK = 45°$.

K2009.5. Osoitetaan, että tehtävän ainoa ratkaisu on funktio $f(x) = x$. Varmistutaan ensin, että tämä funktio kelpaa. Olkoon siis $f(x) = x$ ja olkoot a ja b positiivisia kokonaislukuja. Kolmion sivujen pituuksiksi ovat tarjolla a, b ja $c = a + b - 1$. Nyt $c < a + b$, mutta $c \geq a \geq 1$ ja $c \geq b \geq 1$. Silloin $c > |a - b|$, joten kolmio, jonka sivut ovat a, b ja c on olemassa.

Osoitetaan sitten, että $f(x) = x$ on ainoa ratkaisu. Tähän päästään soveltamalla toistuvasti kolmioepäyhtälöä, jonka mukaan kolmion kahden sivun pituuksien summa on aidosti suurempi kuin kolmas sivu. Osoitetaan ensin epäsuorasti, että $f(1) = 1$. Jos olisi

$f(1) = 1+m > 1$, muodostaisi kaikilla a kolmikko 1, $f(a)$, $f(a+m)$ kolmion sivujen pituudet. Silloin olisi $f(a)-1 < f(a+f(1)-1) < f(a)+1$. Koska f:n arvot ovat kokonaislukuja, on välttämättä $f(a+f(1)-1) = f(a)$ kaikilla a. Jos olisi $f(1)-1 = m > 0$, f voisi saada enintään m eri arvoa $f(1)$, $f(2)$, $\ldots$, $f(m)$, ja jokin niistä olisi suurin; olkoon tämä suurin M. Mutta silloin ei olisi kolmiota, jonka sivut olisivat $2M$, $f(b)$ ja $f(b+f(2M)-1)$. Onkin oltava $m = 0$ eli $f(1) = 1$.

Osoitetaan seuraavaksi, että f on niin sanottu *involuutio* eli että $f(f(a)) = a$ kaikilla a. Tämä seuraa siitä, että a, $1 = f(1)$ ja $f(1 + f(a) - 1) = f(f(a))$ ovat kolmion sivut. Involuutiokuvaukset ovat niin sanottuja injektioita: ne saavat eri pisteissä eri arvot. Jos nimittäin $f(a) = f(b)$, niin $a = f(f(a)) = f(f(b)) = b$. Käytretään hyväksi tätä ominaisuutta.

Koska f on injektio, $f(2) \neq 1$, joten $f(2) = 1 + c$, missä $c \geq 1$. Jos b on mielivaltainen positiivinen kokonaisluku, niin 2, $f(b)$ ja $f(b + f(2) - 1) = f(b + c)$ ovat kolmion sivut, joten $f(b)-2 < f(b+c) < f(b)+2$ tai $f(b)-1 \leq f(b+c) \leq f(b)+1$. Koska $f(b+c) \neq f(b)$, niin $f(b + c) = f(b) \pm 1$. Koska $f(1 + c) = f(f(2)) = 2$, $f(1 + 2c) = f(1 + c) \pm 1 = 2 \pm 1$. Injektiivisyyden vuoksi ei voi olla $f(1 + 2c) = 1$. Siis $f(1 + 2c) = 3$. Induktiolla nähdään helposti, että $f(1 + kc) = k + 1$ kaikilla luonnollisilla luvuilla k. Jos olisi $c > 1$, olisi $f(c) = f(1 + kc)$ jollain luonnollisella luvulla k. Tämä on mahdotonta, joten on oltava $c = 1$. Tästä seuraa, että $f(1 + k) = 1 + k$ kaikilla $k \geq 0$.

K2009.6. Olkoon heinäsirkan hyppyjärjestys $(i_1, i_2, \ldots, i_n)$, jos sen peräkkäisten hyppyjen pituudet ovat $a_{i_1}, a_{i_2}, \ldots, a_{i_n}$. Todistetaan väite induktiolla. Väite on ilmeisen tosi, kun $n = 1$. Olkoon $n > 1$ ja olkoon väite tosi kaikilla n:ää pienemmillä kokonaisluvuilla. Voidaan olettaa, että annetut luvut toteuttavat ehdon $a_1 < a_2 < \cdots < a_n$. Olkoon $d = \min M$. Tarkastellan tilannetta sen mukaan, onko $d < a_n$ vai $d \geq a_n$. Oletetaan ensin, että $d < a_n$. Induktio-oletuksen mukaan heinäsirkka pystyy hyppimään $n-1$:llä hypyllä pisteestä a_n pisteeseen s. Kun sarjaan liitetään hyppy origosta a_n:ään, saadaan vaadittu hyppysarja. Olkoon sitten $a_n = d$. Tarkastellaan n:ää joukkoa, joista jokaisella kahdella on epätyhjä leikkaus: $\{a_n\}$, $\{a_1, a_1 + a_n\}$, $\{a_2, a_2 + a_n\}$, $\ldots$, $\{a_{n-1}, a_{n-1} + a_n\}$. Koska M:ssä on $n-1$ alkiota, ainakin yksi joukoista ei sisällä yhtään M:n alkiota. Olkoon se $\{a_i, a_i + a_n\}$. Joukossa $M \cap [a_i + a_n, s]$ on enintään $n-3$ alkiota, koska d, $a_n < a_i + a_n$. Induktio-oletuksen perusteella heinäsirkka voi hypellä pisteestä $a_i + a_n$ (joka ei kuulu joukkoon M) pisteeseen s käyttäen kaikkia muita hypyn pituuksia kuin a_i ja a_n. Jos nyt ensimmäinen hyppy on a_i ja toinen a_n ja sitten tehdään mainitut $n-3$ hyppyä, saadan vaadittu sarja. Oletetaan sitten, että $d > a_n$. Olkoon $M' = M \setminus \{d\}$. Induktio-oletuksen perusteella heinäsirkka voi hyppiä pisteestä a_n pisteeseen s käymättä joukon M' pisteissä. Olkoon hyppyjärjestys $(i_1, \ldots, i_{n-1})$. Jos tämä reitti ei käy pisteessä d (tällöin on $d > a_n$), niin $(n, i_1, \ldots, i_{n-1})$ on kelvollinen hyppyjärjestys. Muussa tapauksessa voidaan olettaa, että heinäsirkka osuu d:hen hypyllä i_j. Nyt $(i_1, i_2, \ldots, i_j, n, i_{j+1}, \ldots, i_{n-1})$ on myös hyppyjärjestys, joka välttää muut M:n pisteet kuin d:n. Koska $a_{j+1} < a_n$, järjestys $(i_1, i_2, \ldots, i_j, i_{j+1}, n, \ldots, i_{n-1})$ välttää myös d:n. Todistus on valmis.