

ODREĐIVANJE OSOBINA PLAZME TEORIJSKIM PUTEM

Da bi se određena plazma koristila bilo kao *izvor energije* ili *izvor čestica* ili kao *izvor svetlosti* na optimalan način, potrebno je poznavati osobine plazme. Osobine konkretne plazme se mogu određivati eksperimentalnim putem i za takav postupak se obično koristi termin dijagnostika plazme. Dijagnostika plazme podrazumeva određivanje parametara plazme a prvenstveno određivanje temperature i elektronske koncentracije pri određenim uslovima postojanja plazme (vrsta gasa, način uspostavljanja stanja plazme, električni parametri kao što su struja i napon). Postoje različite metode dijagnostike plazme na pr. spektroskopske (koje se i najviše koriste) ali danas postoji i mogućnost da se svojstva plazme odrede teorijskim putem, primenom osnovnih fizičkih zakona. Na osnovu ovih zakona razvijaju je teorijske metode pomoću kojih je moguće izvesti određeno izračunavanje koje se na kraju, obično izvodi pomoću kompjutera, primenom odgovarajućih kmpjuterskih programa. Osobine plazme koje je bitno poznavati su:

a) *sastav plazme* (u opsegu temperatura u kome postoji data plazma) a pod sastavom podrazumevamo vrstu i količinu (molska frakcija) čestica koje čine datu plazmu (atomi, molekuli, joni, elektroni), pri određenoj temperaturi i (obično) na konstantnom pritisku.

b) *termodinamičke funkcije* kao što su: entalpija, specifični ili molarni toplotni kapaciteti, entropija, Gibsova energija itd.

c) *transportne osobine plasme*: koeficijente viskoznosti, difuzije, toplotne i električne provodljivosti.

Pri ispitivanju plazme retko se koristi samo jedan metod, eksperiment ili teorija. Obično se kombinuju oba postupka. Postupak izračunavanja može biti komplikovaniji ili jednostavniji u zavisnosti od toga na kom nivou tačnosti se izvodi ili od toga o kakvoj vrsti plazme je reč. Kada je plazma u termodinamičkoj ravnoteži, izračunavanja su jednostavnija i zasnovana su na važenju Maksvel-Bolcmanovog zakona raspodele čestica po brzinama odnosno energijama kao i na važenju Saha jednačine koja se odnosi na jonizacionu ravnotežu. Kada je plazma u parcijalnoj ravnoteži opet se primenjuje Maksvel-Bolcmanov zakon raspodele ali sa više značenja temperature (elektronska i temperatura težih čestica). Najkomplikovaniji su slučajevi neravnotežnih plazmi, kada je potrebno odrediti funkciju ili funkcije (za svaki tip čestica) raspodele, rešavanjem (Bolcmanove) kinetičke jednačine.

Bolcmanova kinetička jednačina je jednačina opšteg tipa :

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f_a}{\partial \vec{r}} + \frac{\vec{F}_a}{m_a} \cdot \frac{\partial f_a}{\partial \vec{v}} = I_a$$

f je funkcija raspodele definisana u šestodimenzionom prostoru koordinata (\vec{r}) i brzina (\vec{v}), t je vreme, m_a je masa čestice vrste a dok je \vec{F}_a je ukupna srednja sila koja deluje na česticu. vrste a . Veličina I_a se naziva *kolizioni integral* i njegovo predstavljanje zahteva detaljnu analizu svih kolizionih procesa u plazmi. Ispostavlja se da je kolizioni integral obično razlika dva člana, apsorpcionog i emisioinog. Već je unapred jasno da oba ova člana zavise od svih funkcija raspodele čestica posmatrane plazme i da je pri njihovom izračunavanju potrebno integraliti po svim brzinama pre odnosno posle sudara, uzimajući u obzir efikasne preseke za binerne sudare. Naglasićemo da se opšta kinetička jednačina zove npr. Bolcmanova tek uz odgovarajući tip kolizionih integrala koji su kod Bolcmanove jednačine tako definisani da bi se mogli primeniti na sudare koji se odvijaju u razređenom, neutralnom gasu. Landauove kinetičke jednačine sadrže

kolizione integrale takvog oblika koji dobro opisuju sudare u razređenim potpuno jonizovanim plazmama itd.

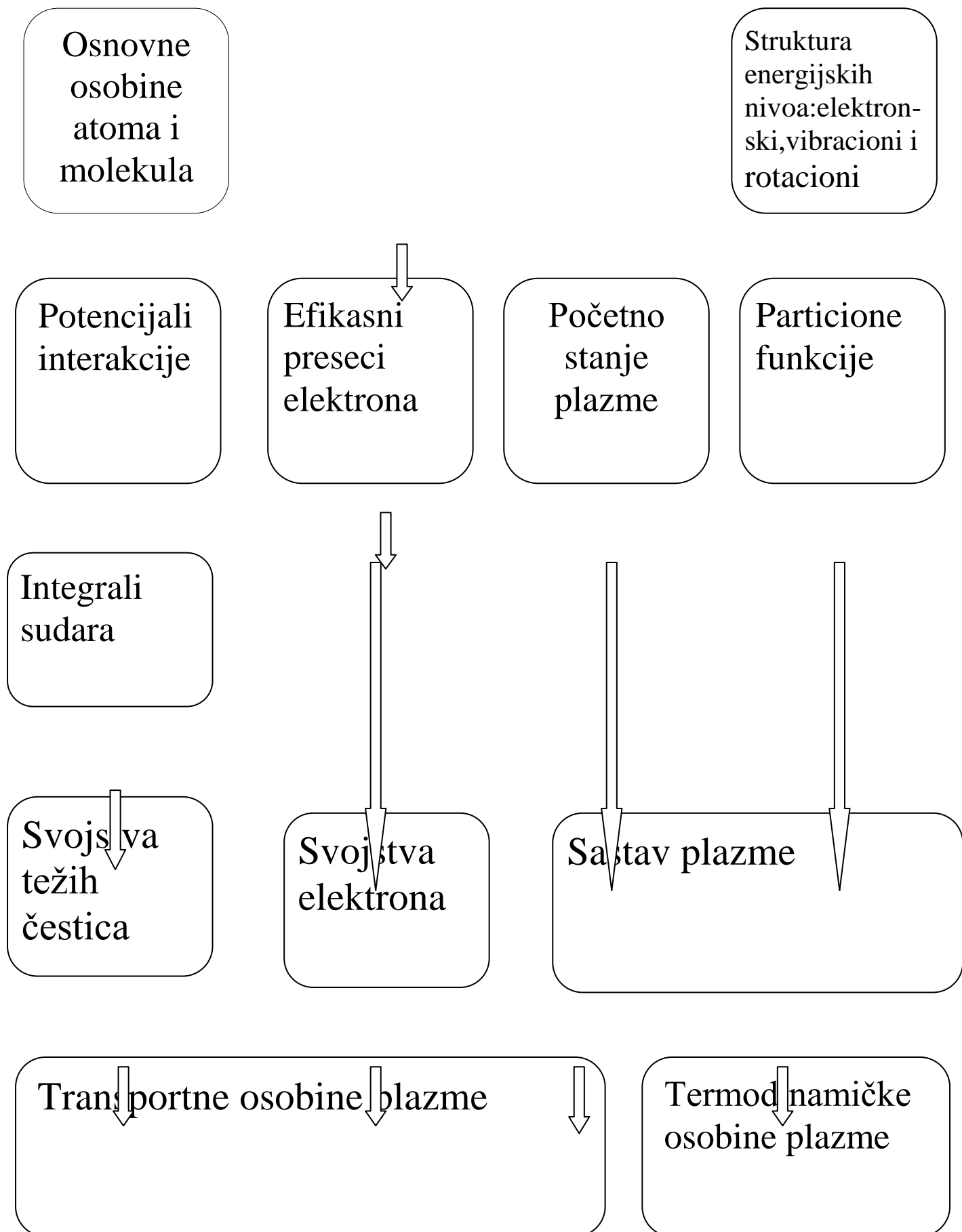
Početni korak u izračunavanju transportnih koeficijenata je određivanje (ravnotežnog) sastava plazme koja se tretira kao plazmena smeša različitih komponenata [neutralnih čestica (atoma, molekula) i naelektrisanih (jona, elektrona)]. Pri određenom molskom udelu konstituenata plazme, ukupna Gibsova energija dostiže najmanju vrednost i to je ravnoteža. Minimum slobodne energije se određuje matematički uz pomoć odgovarajućeg programa i primenom računara. Neophodni podaci za izvođenje ovog proračuna su Gibsove slobodne energije svih čestica plazme (atoma, molekula, jona itd). I ove veličine se mogu izračunati (videti šemu postupka za izračunavanje). One se izračunavaju pomoću jednačina statističke termodinamike koje povezuju sumu stanja ili particionu funkciju (atoma, molekula, jona) sa termodinamičkim funkcijama (inače zakoni statističke fizike i imaju ulogu da povežu osobine pojedinačnog molekula sa makroskopskim svojstvima mnoštva tih istih molekula). A da bismo mogli izračunati particionu funkciju odgovarajućeg molekula npr., moramo prvo odrediti njegovu strukturu. I to se danas vrlo uspešno izvodi teorijskim metodama, npr. *ab initio* metodom.

Prema teoriji Chapman-Enski-Burnett, transportni koeficijenti se mogu izračunati polazeći od plazme određenog sastava pod uslovom da su poznati potencijali za interakciju između bilo koje dve čestice određenog tipa. Posebno se tretiraju elektroni i teže čestice. Prvo se izračunavaju kolizionni integrali $\Omega_{i,j}^{l,s}$ koji su funkcija temperature, T , redukovane mase, m_r relativne brzine, g i totalnog efikasnog preseka $Q^{(l)}$. Sa druge strane, za izračunavanje totalnog efikasnog preseka je potrebno znati diferencijalni efikasni presek $\sigma(g,\theta)$, ugao rasejanja θ i potencijal interakcije ϕ_{ij} između čestica koje se sudaraju. Sami transportni koeficijenti su funkcija kolizionnih integrala, molekulskih masa i molskih frakcija konstituenata plazme.

Na sledećim stranicama su prikazani rezultati proračuna sastava, termodinamičkih funkcija i transportnih koeficijenata nekih plazmi objavljeni u radovima [1,2]

1. B. Pateyron, M.F. Elchinger, G. Delluc and P. Fauchais, Plasma. Chem. Plasma Process. 12 (1992) 421.
2. W.L.T. Chen, J. Heberlein, E. Pfender, B. Pateyron, G. Delluc, M.F. Elchinger, P. Fauchais, Plasma. Chem. Plasma Process. 15 (1995) 559.

ILUSTRACIJA POSTUPKA ZA TEORIJSKO ODREĐIVANJE OSOBINA PLAZME



Transportne osobine plazme

Transportne osobine predstavljaju sposobnost supstancije za prenos materije, energije, impulsa sa jednog mesta na drugo. Kada postoji koncentracioni gradijent nastaje **difuzija**; Prenos energije u pravcu temperaturskog gradijenta je **toplotna provodljivost**; **Viskoznost** je prenos impulsa duž gradijenta brzina dok je **električna provodljivost** prenos naelektrisanja duž gradijenta potencijala. Gasovi na nižim temperaturama nemaju električnu provodljivost. U gasu koji ima visoku temperaturu jonizacijom se stvaraju elektroni (i joni) pa takav gas stiče sposobnost da provodi struju. Takav gas poseduje električnu provodljivost. Brzina prenosa odgovarajućeg svojstva (mase, energije, impulsa..) izražava se kao **fluks** \vec{J} a to je količina svojstva koji prolazi kroz jediničnu površinu u jedinici vremena (1s). Ovaj fluks uvek je proporcionalan odgovarajućem gradijentu. Kod difuzije

$$\vec{J} = -D \nabla n \quad (1)$$

n -broj čestica po jedinici zapremine a D -koeficijent difuzije. Kod toplotne provodljivosti

$$\vec{J} = -\kappa \nabla T \quad (2)$$

T je apsolutna temperatura a κ , koeficijent toplotne provodljivosti. U slučaju viskoznosti važi:

$$\vec{J} = -\eta \nabla v \quad (3)$$

η je koeficijent viskoznosti ili prosto viskoznost je mera otpora (trenja) koji se javlja pri kretanju fluida, v je brzina. Dimenzije J zavise od toga o kome je svojstvu reč. Kod viskoznosti J ima dimenzije $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$; kod toplotne provodljivosti J ima dimenzije $J\ m^{-2}\ s^{-1}$ itd. Za slučaj električne provodljivosti, jednačina analogna jednačinama (1,2,3) glasi:

$$\vec{J} = -\sigma \nabla U = -\sigma \vec{E} \quad (4)$$

gde je U potencijal, E je jačina električnog polja dok je σ koeficijent električne provodljivosti.

Transportni koeficijenti (D , η, κ, σ) se dobijaju usrednjavanjem po velikom broju čestica. Tačna vrednost transportnih koeficijenata zavisi od vrednosti date fizičke veličine u određenom delu plazme. Dakle od gustine čestica određene vrste (atomi, joni, molekuli, elektroni), njihovih masa, raspodela brzina, efikasih preseka sudara određenog tipa. Transportni koeficijenti se određuju ortodoksno korišćenjem Bolcmanove transportne jednačine ali se mogu dobiti i na osnovu jednostavnih gasno-kinetičkih razmatranja. Tako se za koeficijent viskoznosti η dobija:

$$\eta = \frac{1}{3} n m \Lambda \langle v \rangle \quad (5)$$

n je broj molekula po jedinici zapremine, m je masa molekula, Λ je srednji slobodni put a $\langle v \rangle$, je srednja brzina koja je jednaka $(8kT/\pi m)^{1/2}$. k je Bolcmanova konstanta, T temperatura, m masa molekula. Koeficijent difuzije je :

$$D = \frac{1}{3} \Lambda \langle v \rangle m \quad (6)$$

i za koeficijent toplotne provodljivosti:

$$\kappa = \frac{1}{3} n \Lambda \langle v \rangle c_V \quad (7)$$

gde je c_V specifična toplota pri konstantnoj zapremini.

Radi pojednostavljenja pri izračunavanju električne provodljivosti, σ uzećemo da samo elektroni doprinose prenosu naelektrisanja. Fluks naelektrisanja pod uticajem električnog polja je:

$$\vec{J} = en\vec{v}_d = \sigma_e E \quad (8)$$

gde je v_d je usmerena brzina elektrona pod uticajem električnog polja. Ova brzina je jednaka proizvodu pokretljivosti elektrona μ i jačine električnog polja E :

$$\vec{v}_d = \mu \vec{E}, \quad \mu_e = \frac{\sigma}{en_e} = \frac{e}{m z_{en}} \Rightarrow \sigma = \frac{n_e e^2}{m z_{en}} \quad (9)$$

z_{en} je frekvencija sudara elektron-neutralne čestice.

Svaki od pomenutih transportnih koeficijenata u plazmi sa više oblika čestica (atomi, molekuli, joni) dobija se kao zbir doprinosa od pojedinačnih oblika ili vrsta čestica. Zato je potrebno znati pre svega *sastav plazme*, tj molski udeo atoma, jona, molekula u plazmi pri određenoj temperaturi. Ali da bi se to izračunalo treba znati strukture eventualno prisutnih molekula, njihove energije disocijacije, jonizacije i sl. Što smo ranije pomenuli. Pri ovakvim izračunavanjima treba odrediti i frekvencije odgovarajućih sudara, vrednosti srednjeg slobodnog puta itd.

1. P.W. Atkins, *Physical Chemistry*, fifth Edition, Oxford University Press, Oxford, Melbourne, Tokio, 1994.

Na sledećim stranicama su prikazani rezultati proračuna sastava, termodinamičkih funkcija i transportnih koeficijenata nekih plazmi objavljeni u radovima [1,2]:

1. B. Pateyron, M.F. Elchinger, G. Delluc and P. Fauchais, Plasma. Chem. Plasma Process. 12 (1992) 421.
2. W.L.T. Chen, J. Heberlein, E. Pfender, B. Pateyron, G. Delluc, M.F. Elchinger, P. Fauchais, Plasma. Chem. Plasma Process. 15 (1995) 559.

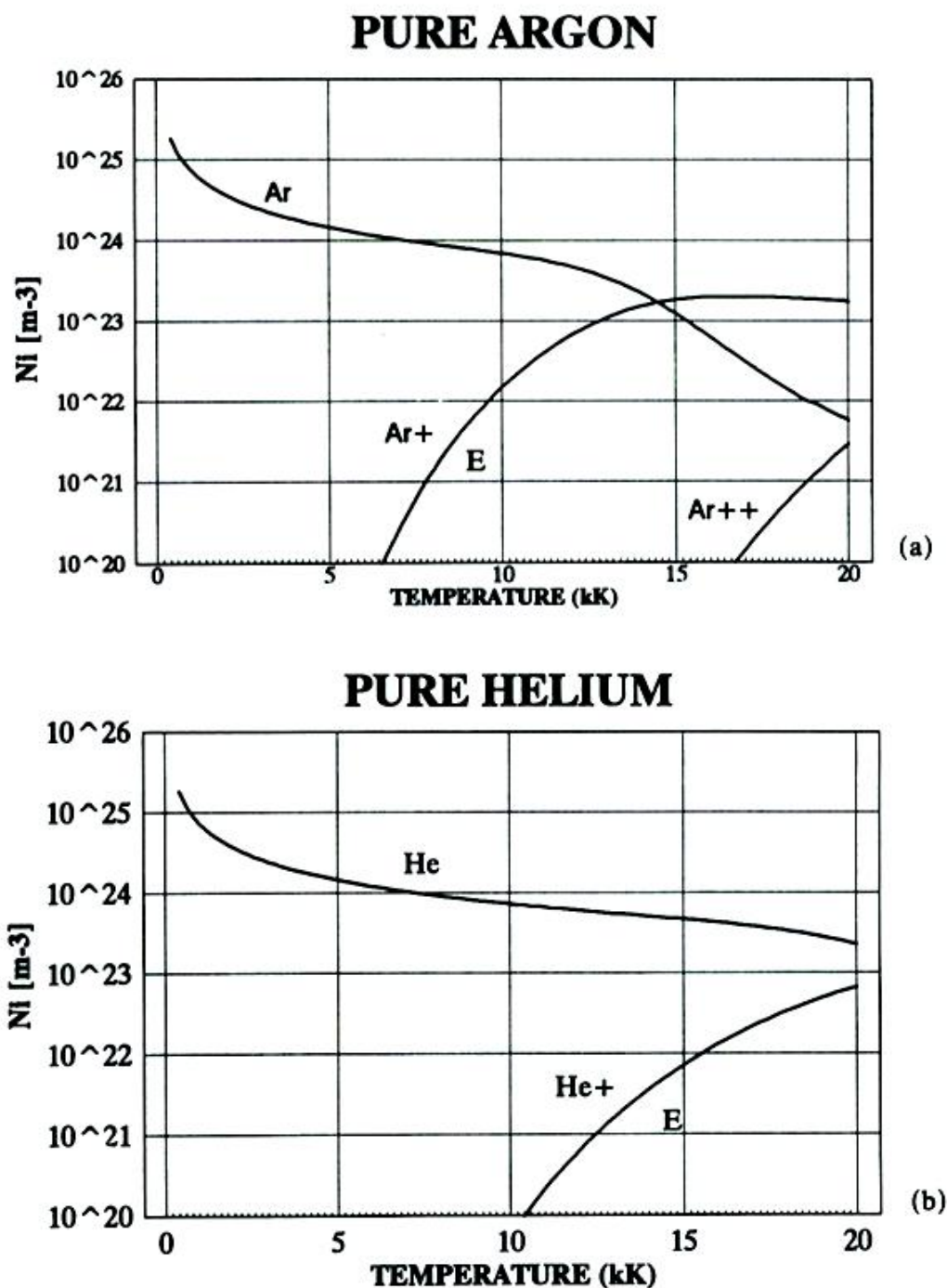


Fig. 1. Evolution versus temperature at atmospheric pressure of the number of moles n_i of the different species in argon (a), helium, (b), and hydrogen plasmas (c).

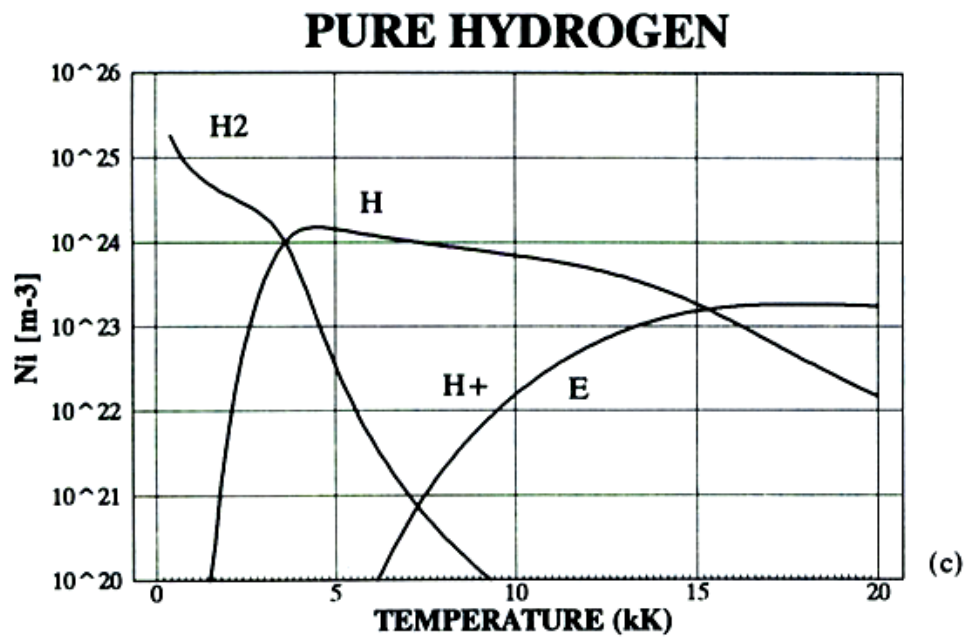


Fig. 1. (continued).

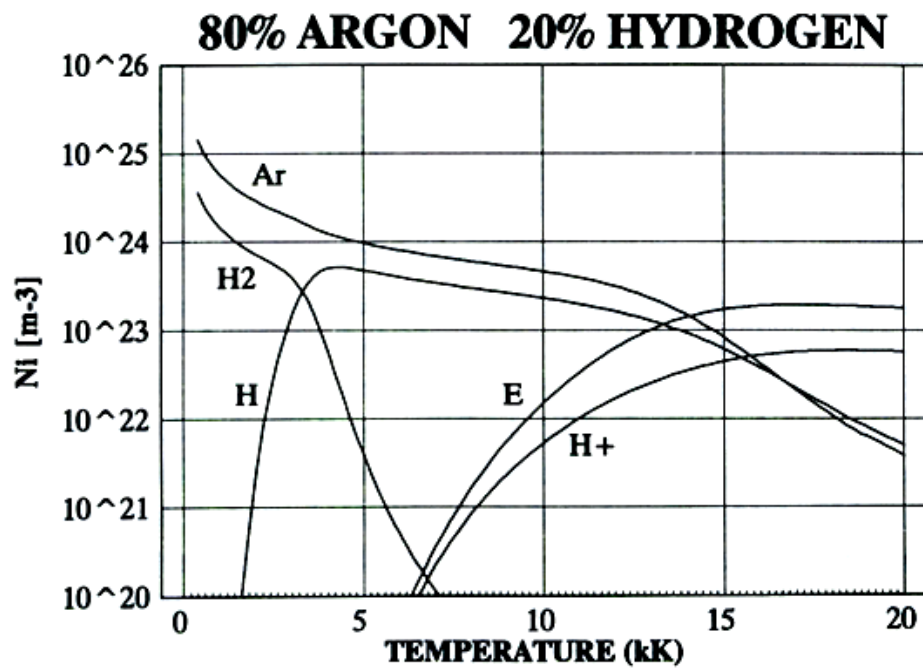


Fig. 2. Evolution versus temperature at atmospheric pressure of the number of moles n_i of the different species in an argon-hydrogen plasma ($\text{Ar}/\text{H} = 0.8/0.2$).

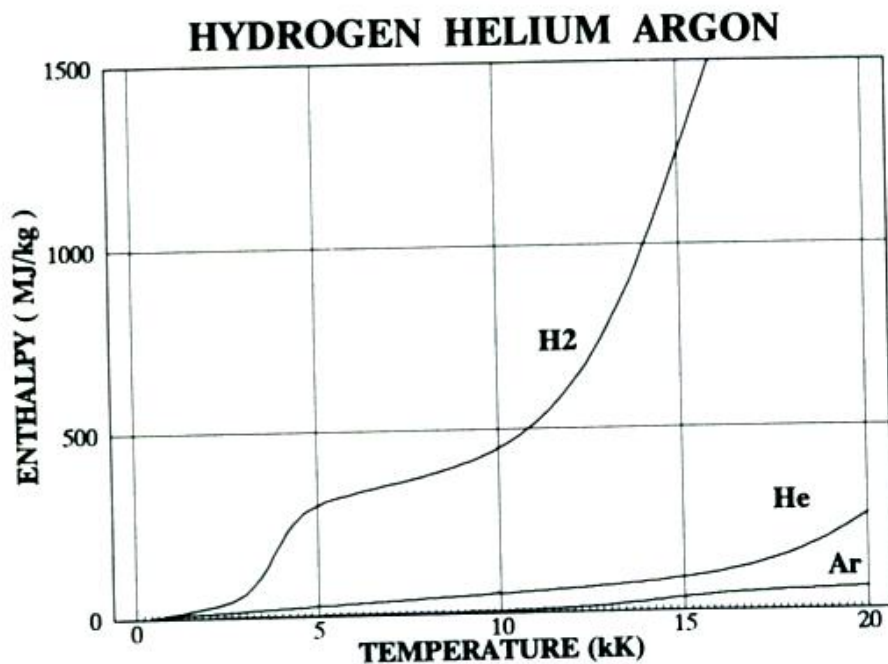


Fig. 4. Evolution versus temperature at atmospheric pressure of specific mass enthalpies Δh of argon, hydrogen, and helium plasmas.

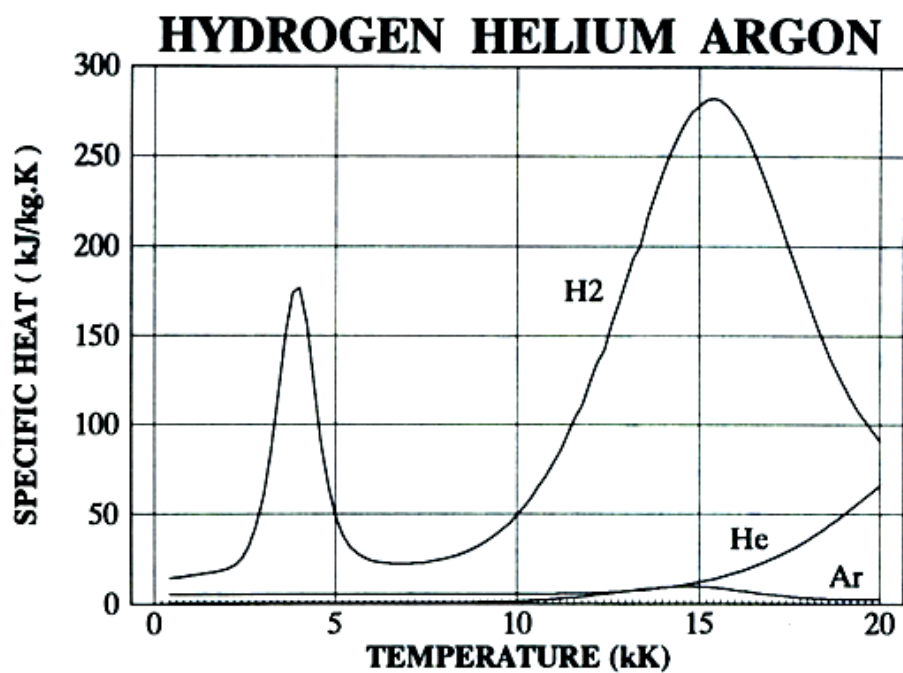


Fig. 5. Evolution versus temperature at atmospheric pressure of specific heat C_p of argon, hydrogen, and helium plasmas.

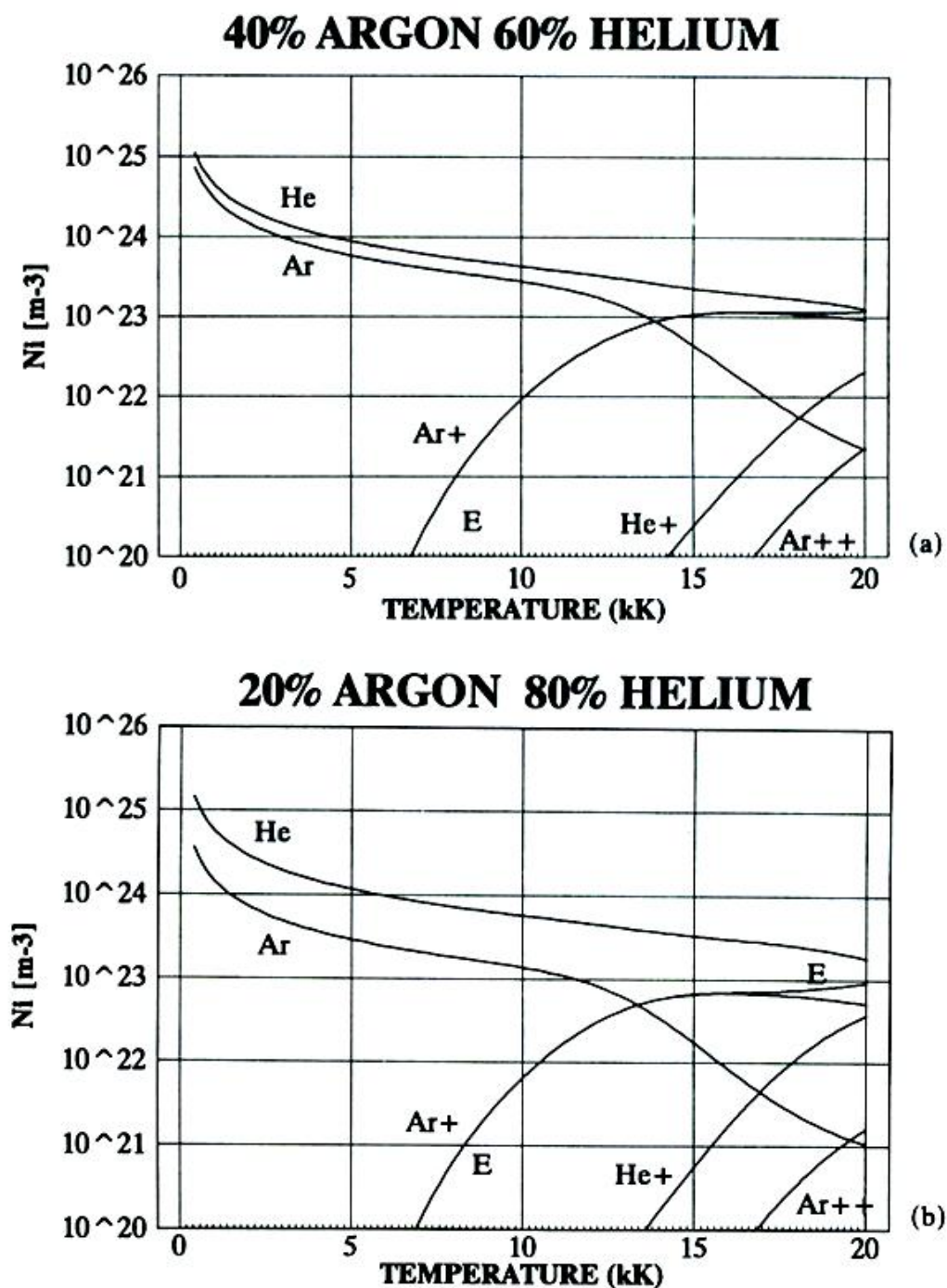


Fig. 3. Evolution versus temperature at atmospheric pressure of the number of moles n_i of the different species in a helium–argon plasma. (a) He/Ar = 0.6/0.4; (b) He/Ar = 0.8/0.2.

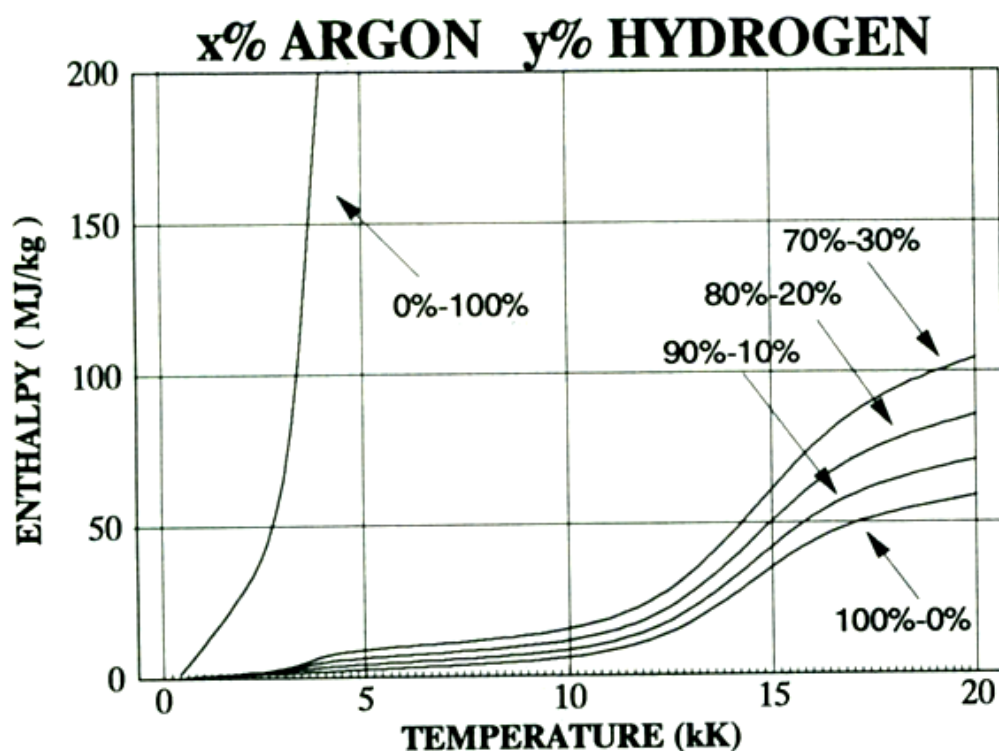


Fig. 6. Evolution versus temperature at atmospheric pressure of specific mass enthalpies Δh of argon-hydrogen plasmas with 0, 10, 20, 30, and 100 vol.% of H_2 .

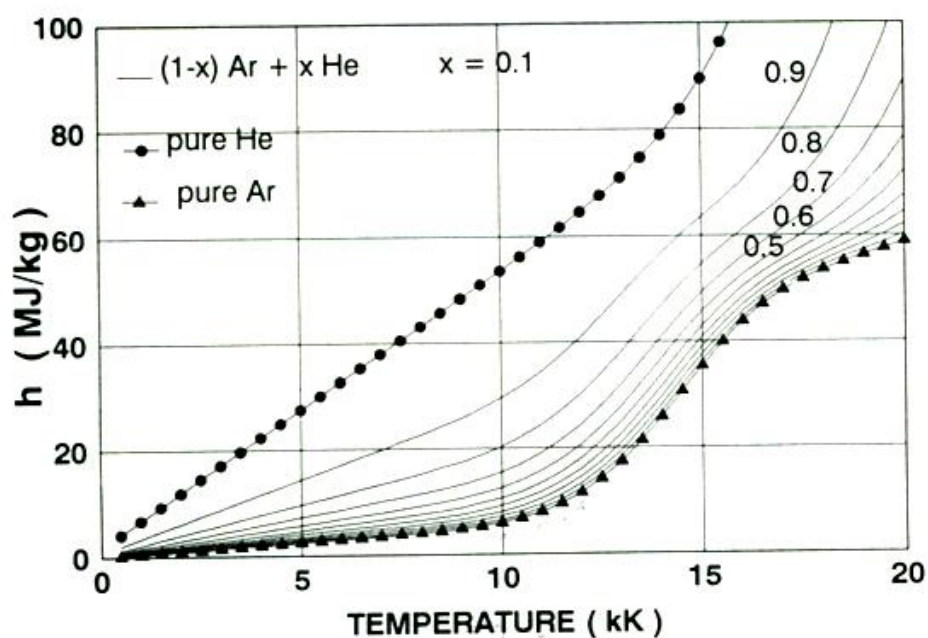


Fig. 7. Evolution versus temperature at atmospheric pressure of specific mass enthalpies Δh of argon-helium plasmas with 0, 50, 60, 70, 80, 90, and 100 vol.% of He.

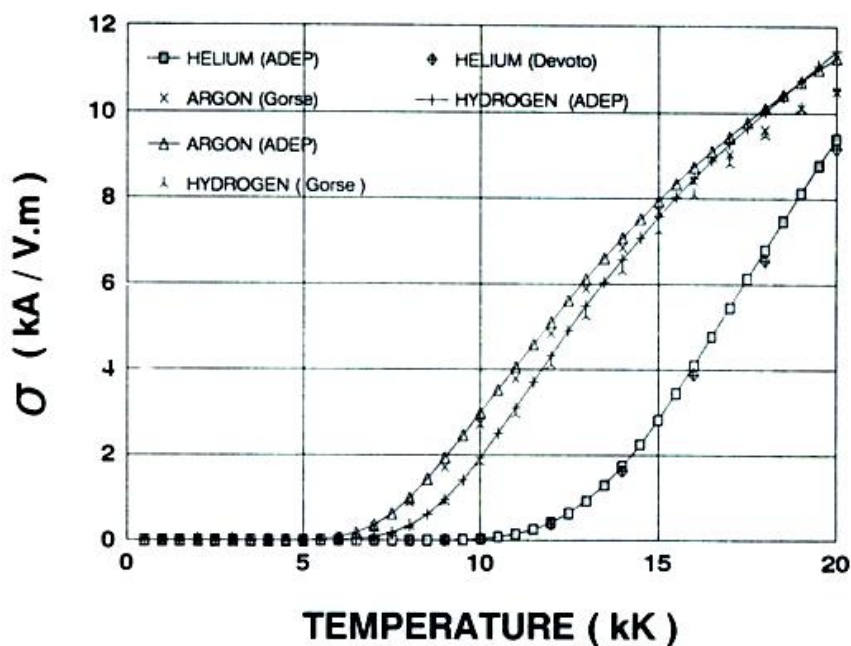


Fig. 8. Evolution versus temperature at atmospheric pressure of electrical conductivity of argon, hydrogen, and helium plasmas from this work and from the works of different authors.

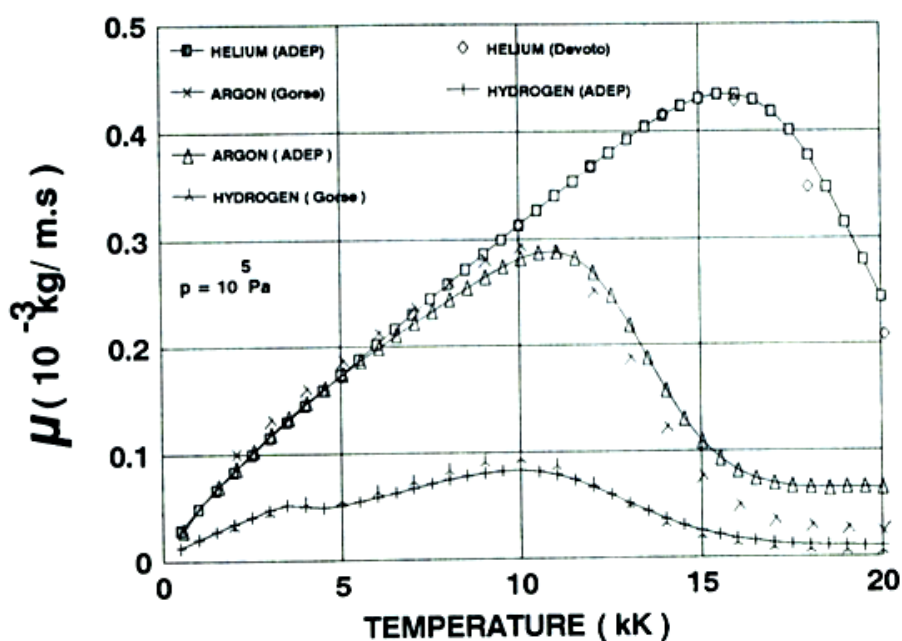


Fig. 11. Evolution versus temperature at atmospheric pressure of molecular viscosity μ of argon, hydrogen, and helium plasmas from this work and from the works of different authors.

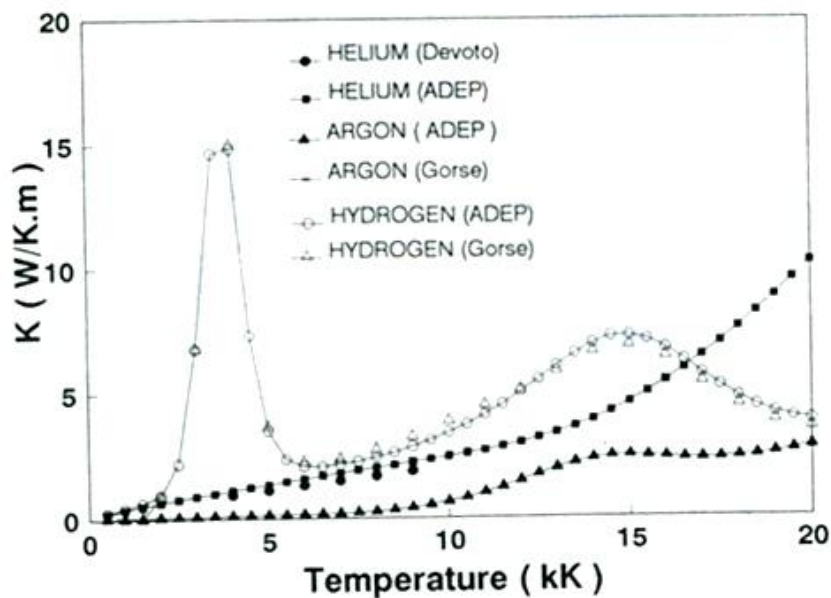


Fig. 18. Evolution versus temperature at atmospheric pressure of the thermal conductivity K of argon, hydrogen, and helium plasmas from this work and from the works of different authors.

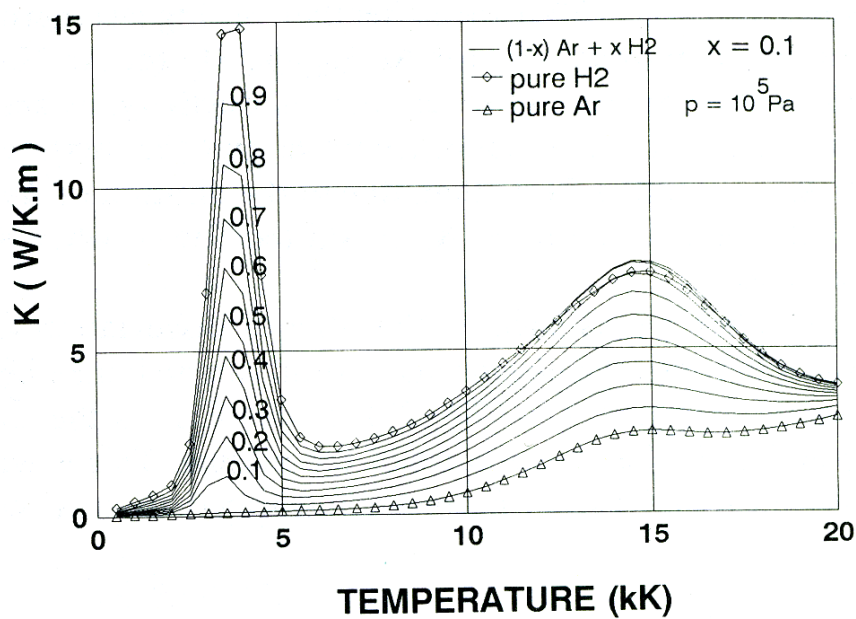


Fig. 19. Evolution versus temperature at atmospheric pressure of the thermal conductivity K of argon-hydrogen plasmas with different H_2 vol.% varying from 0 to 100 in step of 10%.