

# 3. Kmitajúci plameň

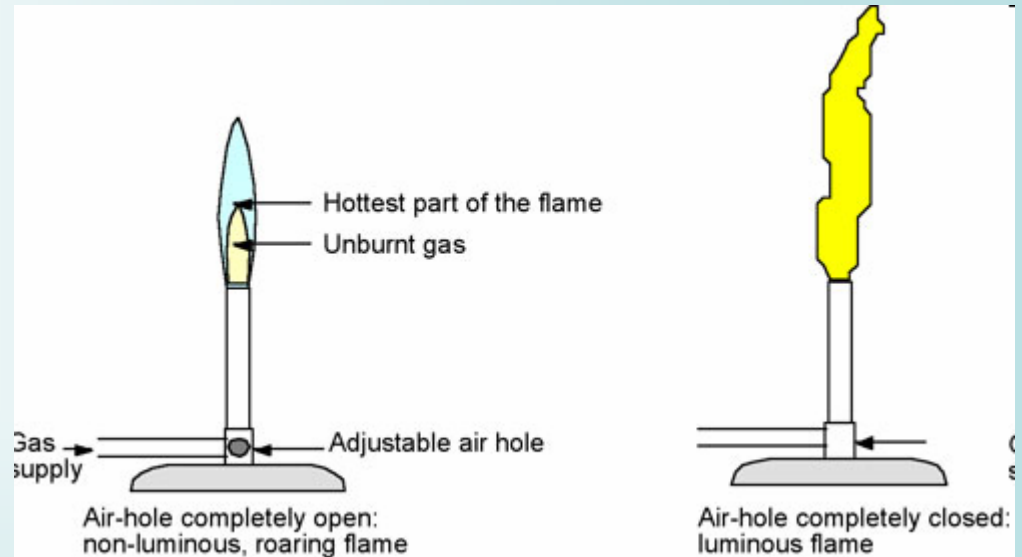
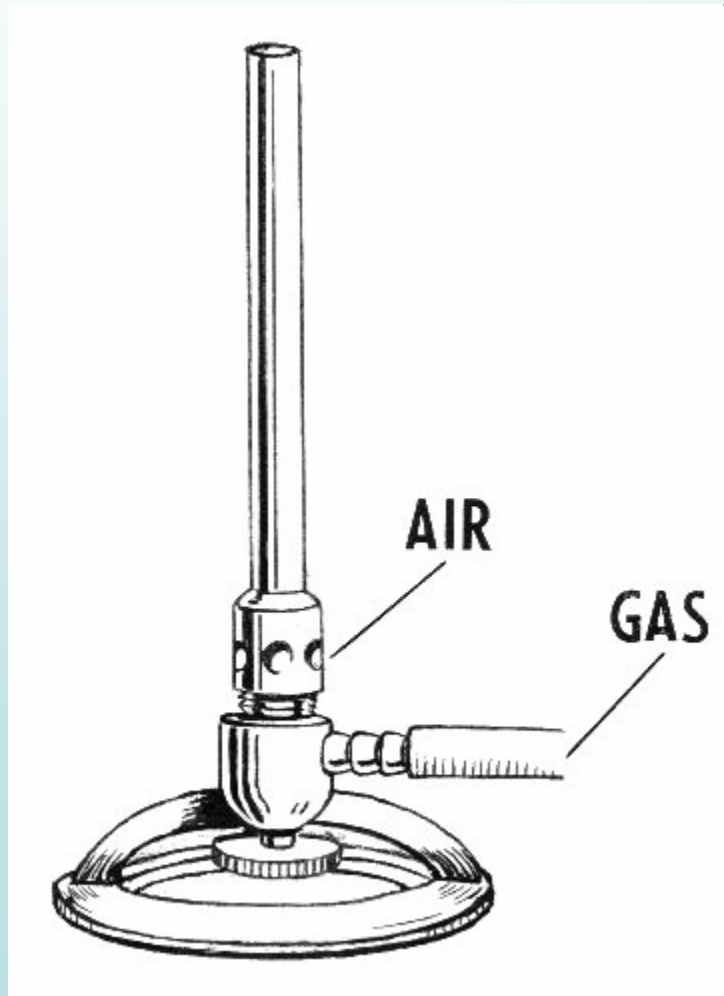
Doc. RNDr. Zdenko Machala, PhD.

FMFI UK

[machala@fmph.uniba.sk](mailto:machala@fmph.uniba.sk)

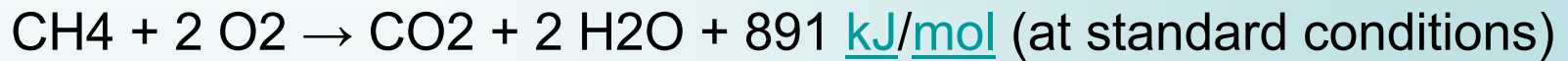
Umiestnite plameň (napríklad Bunsenov horák) medzi dve paralelné nabité kovové platne. Preskúmajte pohyb plameňa.

# Bunsenov horák (Bunsen burner)



# Plameň (Flame)

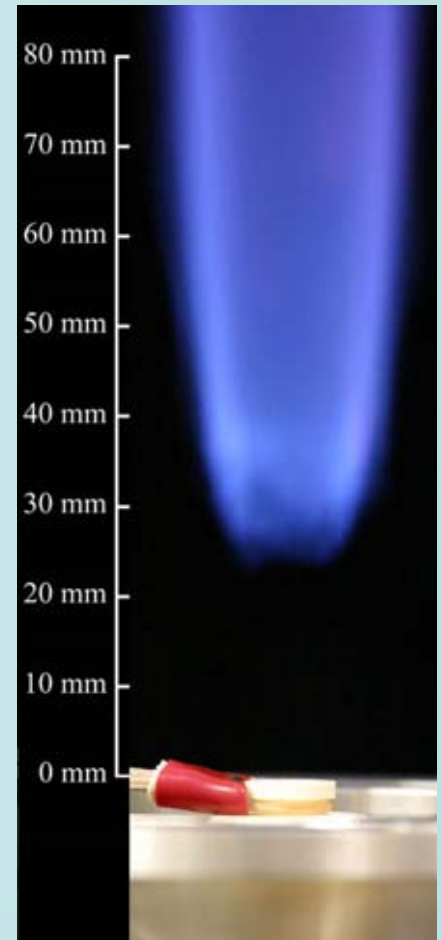
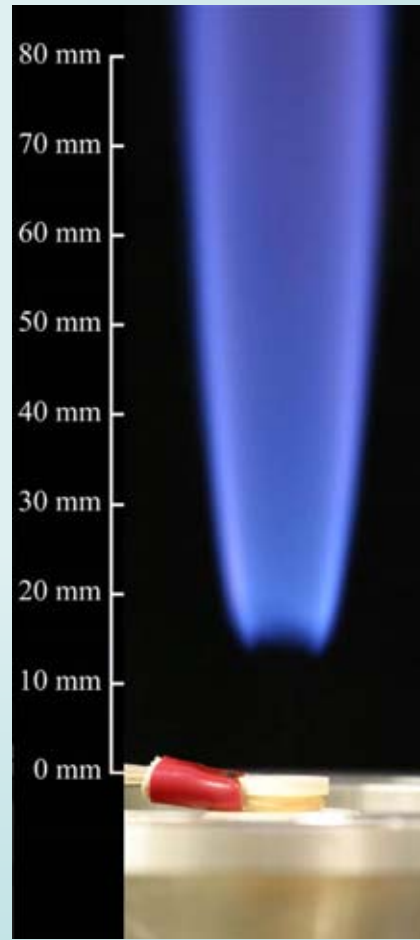
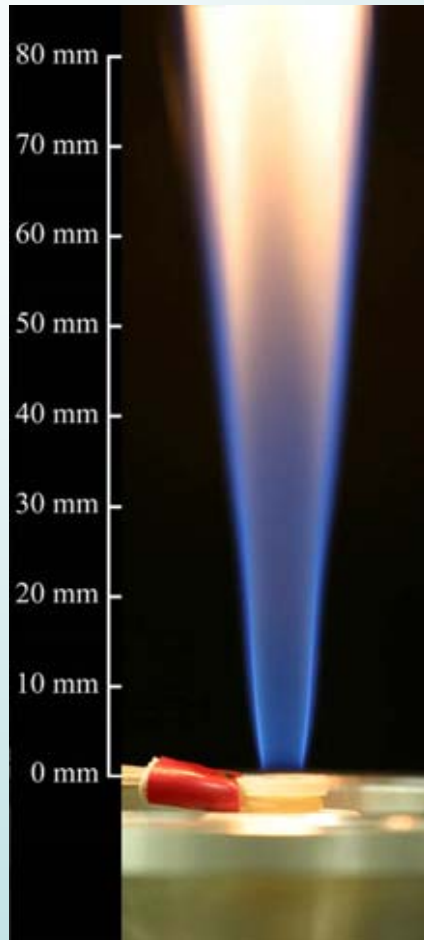
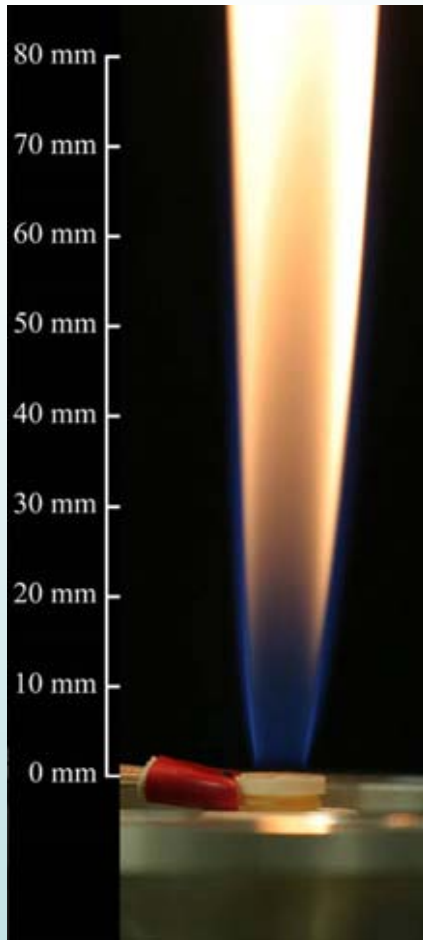
- Vzniká pri horení
- Chemická reakcia exotermická, oxidačná – uvoľňuje teplo  
Zemný plyn – hlavne metán



V skutočnosti oveľa zložitejšie - 53 častíc and 325 elementary reakcií, hlavne radikálových (medziprodukty)

- Difúzny plameň ([diffusion flame](#)) - oxygen and fuel diffuse into each other; where they meet the flame occurs.
- Predmiešaný plameň - [premixed flame](#), the oxygen and fuel are premixed beforehand – otvorený Bunsenov horák
- [Bunsen burner](#) flame 900–1600 °C (depending on the air valve, predmiešaný vyššia teplota)
- Zdroj: Wikipedia

# Difúzný plameň



Vertikálna rýchlosť

$v = 4$

14

20

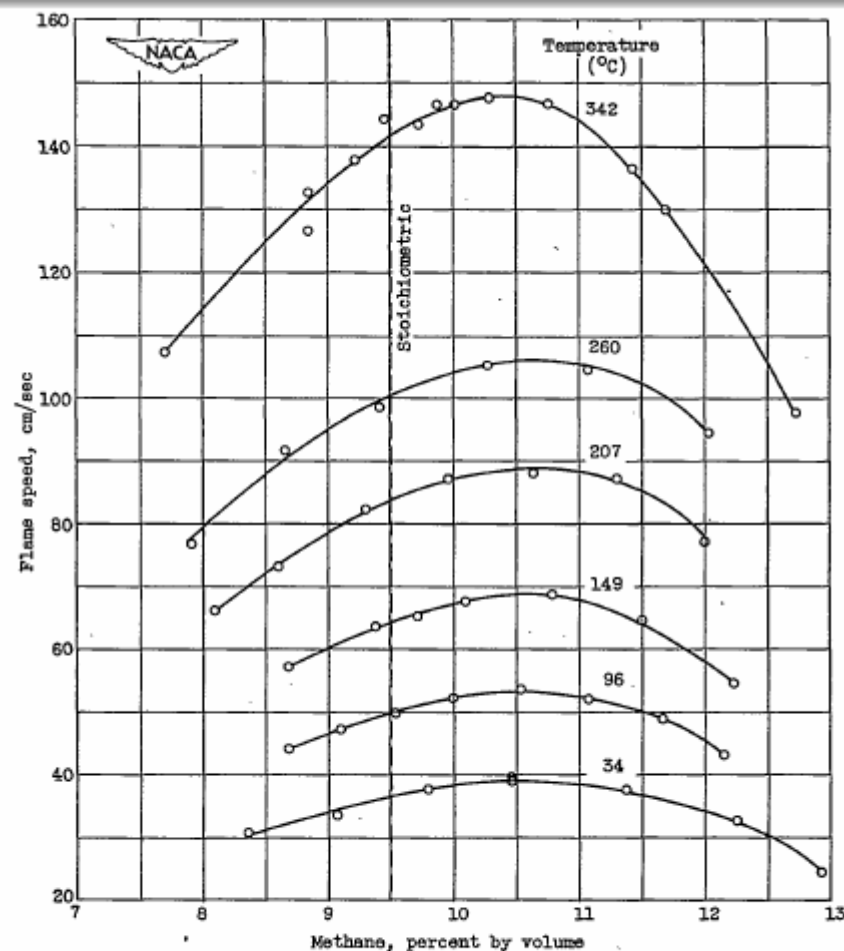
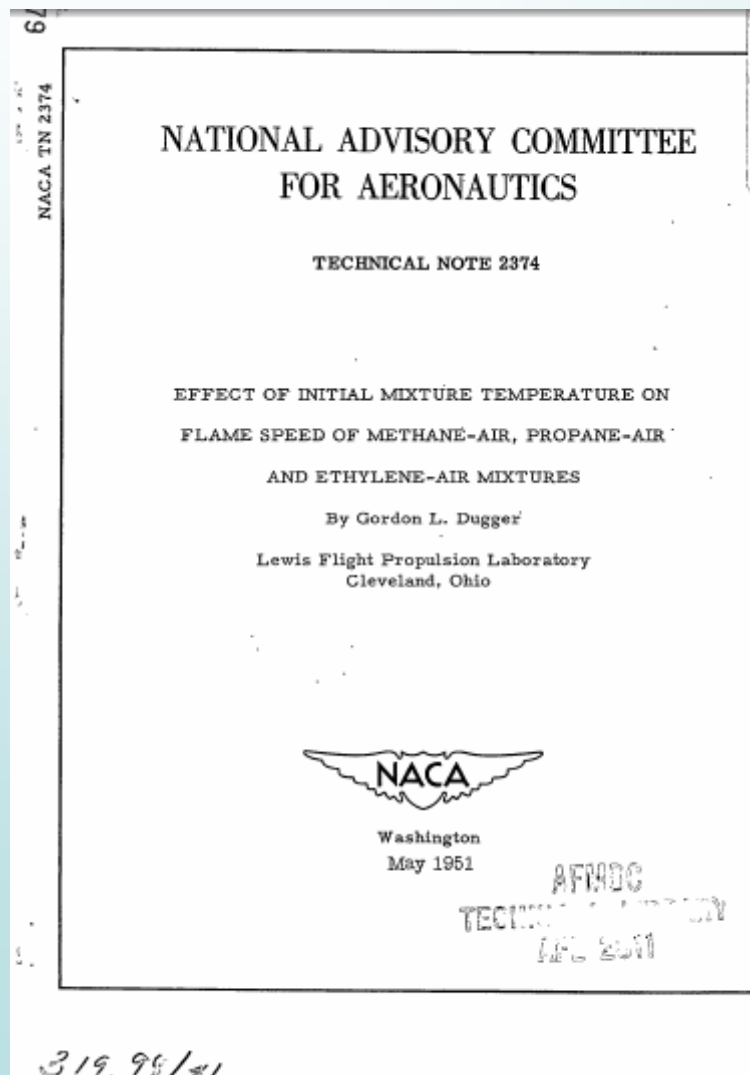
26 m/s

A. Vincent-Randonnier: *Plasma assisted combustion: effect of a coaxial DBD on a methane diffusion flame*, Plasma Sources Sci. Technol. **16** (2007) 149–160

# Rýchlosť plameňa (Flame velocity)

Empirický vzťah pre  $\text{CH}_4$ :  $v \text{ [cm/s]} = 0.00078 \cdot T(\text{K})^{1.89}$

Zdroj: <http://books.google.sk/>

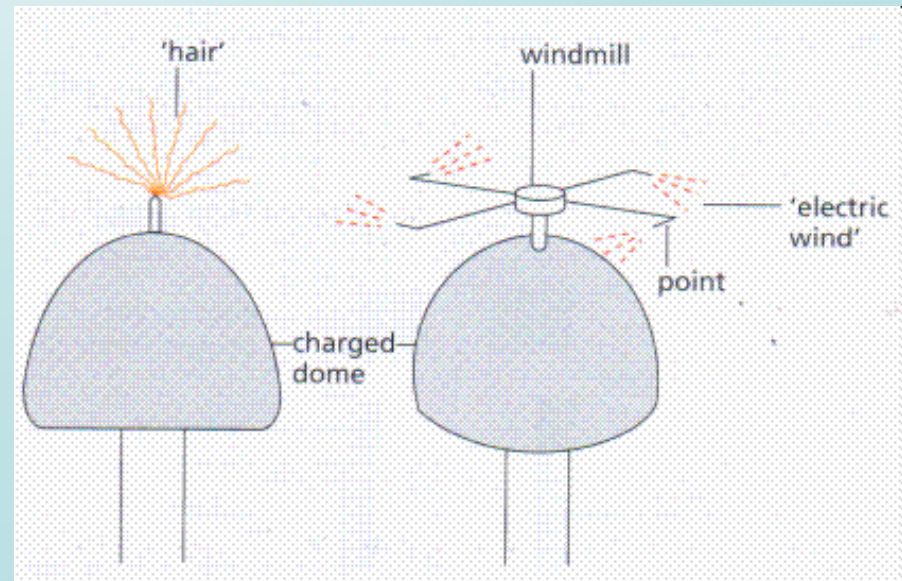
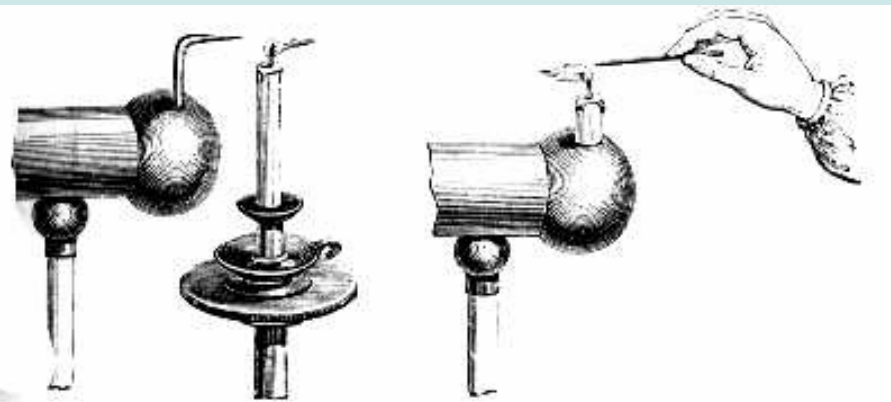


(a) Methane-air flames. Tube diameter, 1.57 centimeters; stream-flow Reynolds number, approximately 1500.

Figure 3. - Flame speed as a function of percentage fuel by volume at various temperatures.

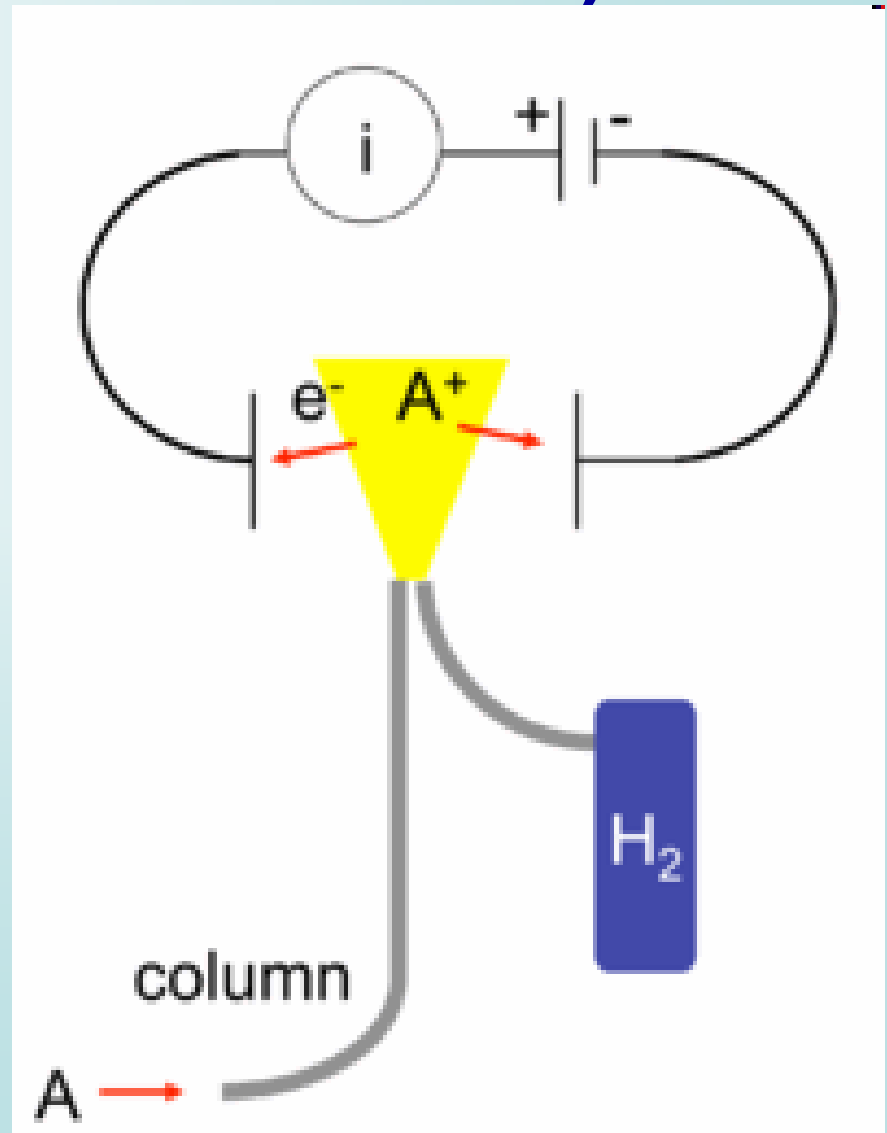
# Elektrický vietor (Electric wind)

- R.C. McClung: Conduction and electricity through gases and radioactivity: a textbook with experiments, 1905, p. 115, Ionization from flames <http://books.google.sk/>
- **"Electric Wind."** A candle flame held near a pointed conductor connected to the positive terminal of a static machine is strongly repelled from the point as if a breeze of ions were actually issuing from the point. If the flame is held near the negative terminal, it is attracted toward it. The phenomenon is one of electrostatic repulsion and attraction rather than of any strong ion current issuing from the positive point. In the luminous part of the flame, **positive ions predominate**.



# Plameňový ionizačný detektor (Flame ionization detector)

- Detektor pre plynovú chromatografiu – chemická analytická metóda
- Detekovaný plyn sa dávkuje do vodíkového plameňa medzi 2 elektródami, v ňom čiastočne sa ionizuje – meriame prúd
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Flame\\_ionization\\_detector](http://en.wikipedia.org/wiki/Flame_ionization_detector)



# Stupeň ionizácie plameňa

- **C.S. MacLachy**, Langmuir probe measurements of ion density in an atmospheric-pressure air-propane flame, [Combustion and Flame Volume 36](#), 1979, Pages 171-178

A measurement of the ion density in the flame front of an atmospheric-pressure, premixed air-propane flame is presented. It is based on the sheath-convection model of current collection by a Langmuir probe. In contrast to the results of previous authors, **ion densities as high as  $4 \times 10^{17}$  ions/m<sup>3</sup>** have been measured in a stoichiometric flame. The half width of the density profile appears to be the same width as the heat-release zone reported by previous authors. This result implies that the probe is capable of spatially resolving the density profile. Observations of the change in the ion-density profile of the flame with respect to the air-fuel mixture ratio and the effect of seeding the flame with KOH are also presented.

- Termická ionizácia (nárazom atómov, molekúl)



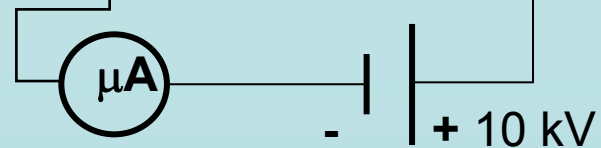
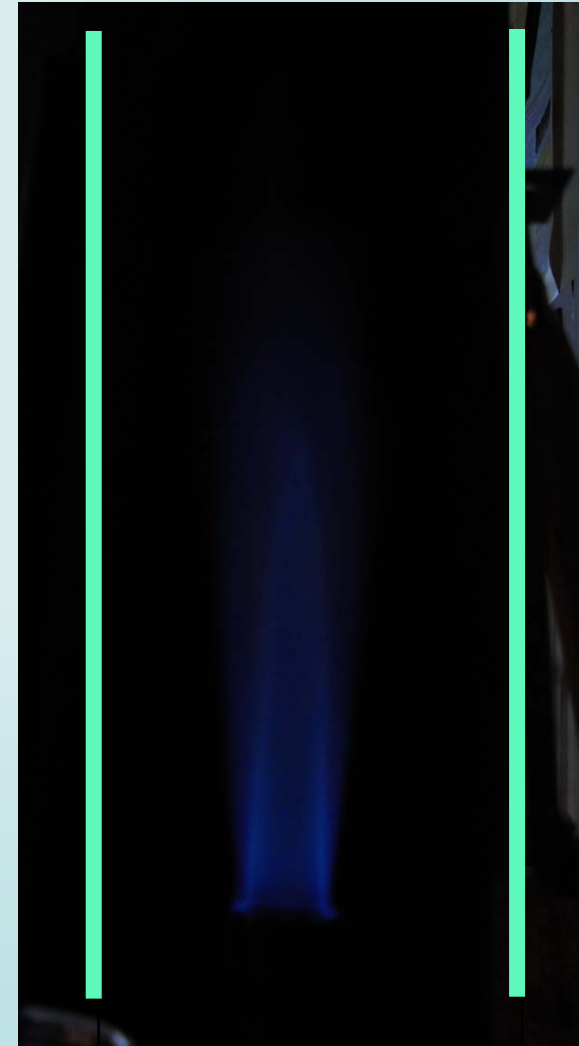
- Chemická ionizácia (interakciou radikálov, excitovaných častíc)





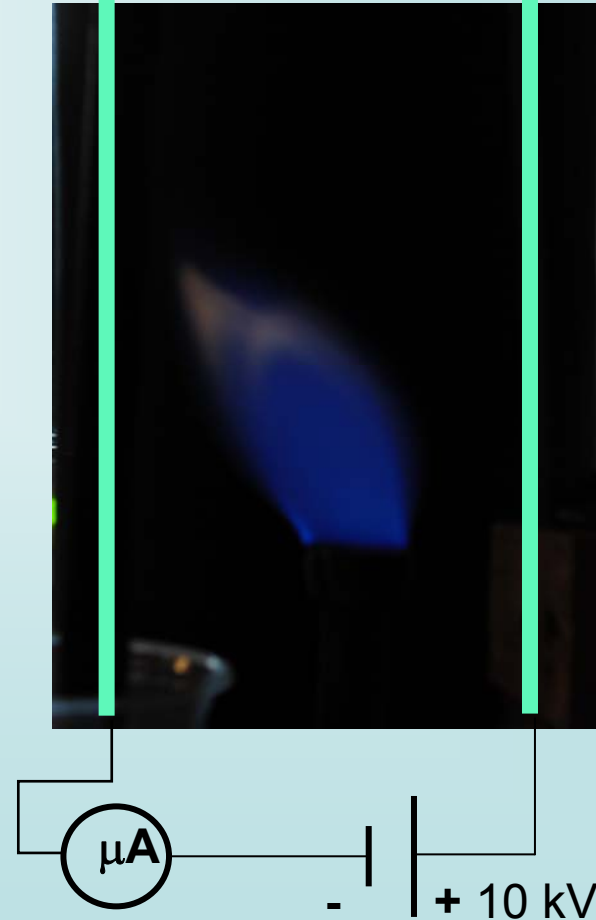
# Pozorovanie – predmiešaný plameň

- Nič sa nedeje,  $I = 10\text{-}11\text{ mA}$



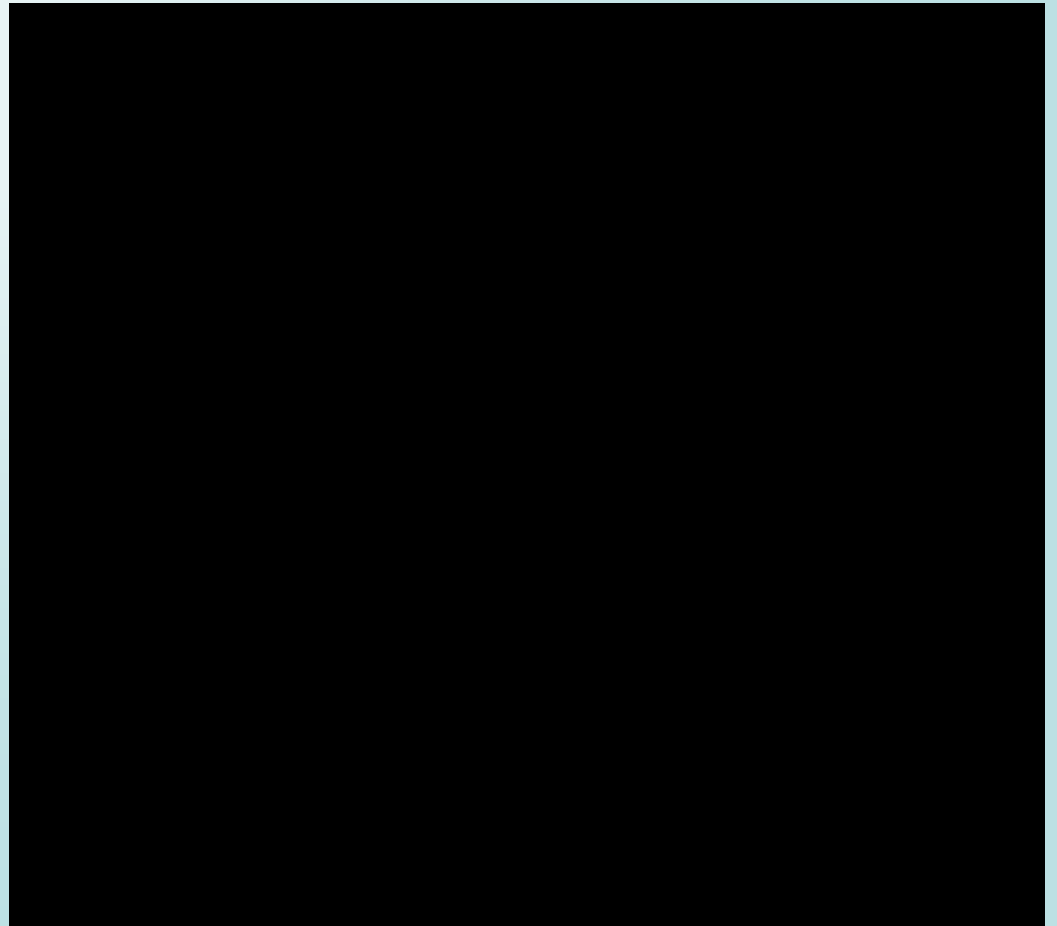
# Pozorovanie – difúzny plameň

- Plameň sa nakláňa ku katóde (-)
- $I = 13\text{--}15\ \mu\text{A}$



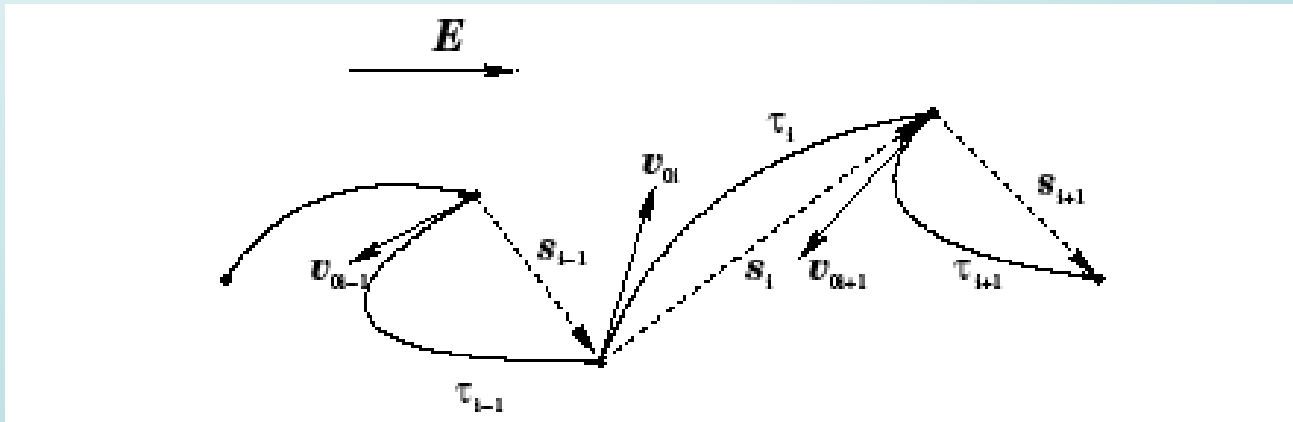
# Video

- Plameň sa nakláňa ku katóde (-)
- Plameň kmitá:  $f \approx 10 \text{ Hz}$
- F sa dá merať aj osciloskopom – merať U a I – oscilácie U a I-pulzy:  $f \approx 10\text{-}20 \text{ Hz}$



# Pohyb elektrónov a iónov v plameni

- Bez zrážok  
 $\mathbf{F} = e\mathbf{E} = m\mathbf{a}$   
 $a = dv/dt = e/m * E$   
 $v = e/m * E * t + v_0$
- So zrážkami – pri  $p_a$  nutné uvažovať
- Driftová rýchlosť  $v_d = \mu E = e/m * v * E$   
pohyblivosť  $\mu = e/mv$   
zrážková frekvencia  $\nu$  – počet zrážok za s



- Viktor Martišovič: ZÁKLADY FYZIKY PLAZMY, FMFI UK Bratislava, 2004

# Elektróny

- $v_d = \mu_e E$
- Zákony podobnosti vo fyzike plazmy  
vzduch:  $\mu_e p = 4,6 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ Torr V}^{-1} \text{ s}^{-1}$   
CO<sub>2</sub>:  $\mu_e p = 11 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ Torr V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
- My máme všade  $p_a$ , lepšia je n-reprezentácia cez hustotu častíc,  $p = nkT$  (stavová rovnica)  
vzduch:  $\mu_e n = 1,48 \times 10^{24} \text{ m}^{-1} \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$   
CO<sub>2</sub>:  $\mu_e n = 3,55 \times 10^{24} \text{ m}^{-1} \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
- Ešte potrebujeme E : zmerať U a predeliť vzdialenosťou elektród d  
a n :  $n = p/kT$  – potrebujeme vedieť T plameňa
- $v_{de} = \mu_e E = \mu_e n^* E/n$   
Pre  $E = 2 \text{ kV/cm}$  a  $n = 3,86 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$  ( $T = 1900 \text{ K}$  – maximum Bunsen)  
 $v_{de} = 1,85 \times 10^5 \text{ ms}^{-1}$   
**Elektróny veľmi rýchlo utečú z plameňa na anódu!**

Yu. P. Raizer: *Gas Discharge Physics*, New York: Springer (1991), p. 11

Z. Machala, M. Janda, K. Hensel, I. Jedlovský, L. Leštinská, V. Foltin, V.

Martišovitš, M. Morvová: *Emission spectroscopy of atmospheric pressure plasmas for bio-medical and environmental applications*, J. Molec. Spectrosc. **243** (2007) 194-201

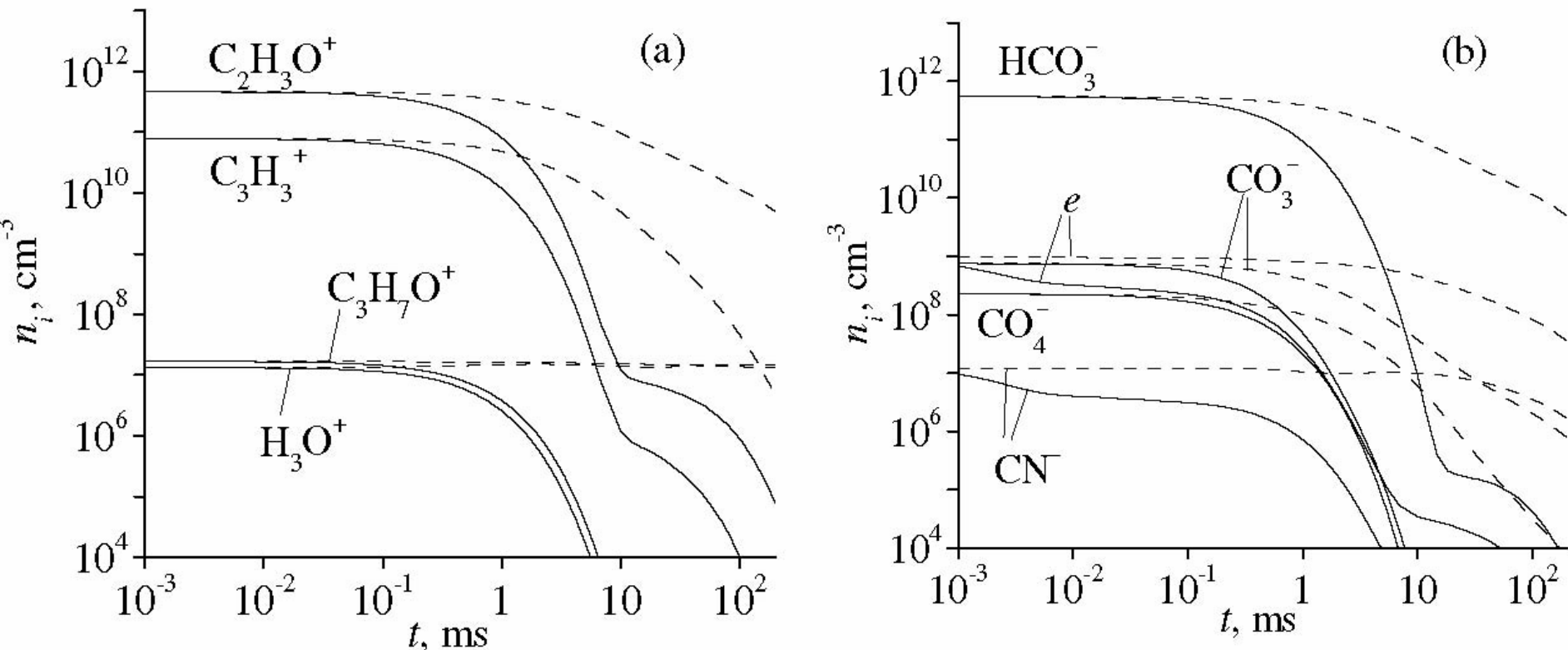
# ióny

- $m_e \ll m_i$  (rádovo  $10^5$  x),  
pretože  $m_p = 1838 \cdot m_e$ ,  $m_n = 1840 \cdot m_e$
- *ióny*  $\text{CO}_2^+$ :  $m = 81000 \cdot m_e$   
 $\text{CO}_2^+$ :  $\mu_i n = 4,38 \times 10^{19} \text{ m}^{-1} \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$
- $v_{di} = \mu_i E = \mu_i n \cdot E / n = 2,1 \text{ ms}^{-1}$   
*ióny sa pomaly budú hýbať na katódu!*
- Ióny sú veľké, strhávajú pohybom aj molekuly okolitého plynu - celý plameň sa nakloní
- Pozor na *vertikálnu rýchlosť* plameňa  $v$   
 $v > v_{di}$ , ak porovnateľné - naklonenie ku katóde  
Ak  $v \gg v_{di}$  efekt už nepozorujeme – predmiešaný plameň?  
overté!

# Komplikácia s iónmi

- Predpokladali sme jednoduchú termickú ionizáciu (nárazom atómov, molekúl) – len  $e^-$  a kladné ióny  
-  $A + B \rightarrow A^+ + B + e^-$
- A len na výsledných produktoch –  $CO_2$
- V skutočnosti je tam veľa rôznych iónov – nedokonale oxidované produkty, radikály, ...
- A M Starik: Formation of charged nanoparticles in hydrocarbon flames: principal mechanisms, Plasma Sources Sci. Technol. **17** (2008) 045012  
*„Numerous types of positive and negative ions such as  $C_2H_3O^+$ ,  $C_3H_3^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $HCO^+$ ,  $C_3H_5O^+$ ,  $C_3H_7O^+$ ,  $H_3O^+$ ,  $H_2O^+$ ,  $O^{+2}$ ,  $NO^+$ ,  $NO^{+2}$ ,  $HCO^{-2}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^-$ ,  $CO_4^-$ ,  $O_2^-$ ,  $OH^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $CN^-$  have been observed in hydrocarbon/air flames“*
- Záporné ióny vznikajú elektrónovým záchyтом  
Trojčasticový záchyt  $A + e^- + M \rightarrow A^- + M$   
Disociatívny záchyt  $AB + e^- \rightarrow A^- + B$

# Ako je to s iónmi naozaj



**Figure 5.** Variation of the number density  $n_i$  of positive (a) and negative (b) ions in the atmospheric pressure  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{air}$  flame ( $\phi = 2.06$ ) with ion-particle interaction (solid curves) and without such interaction (dashed curves).

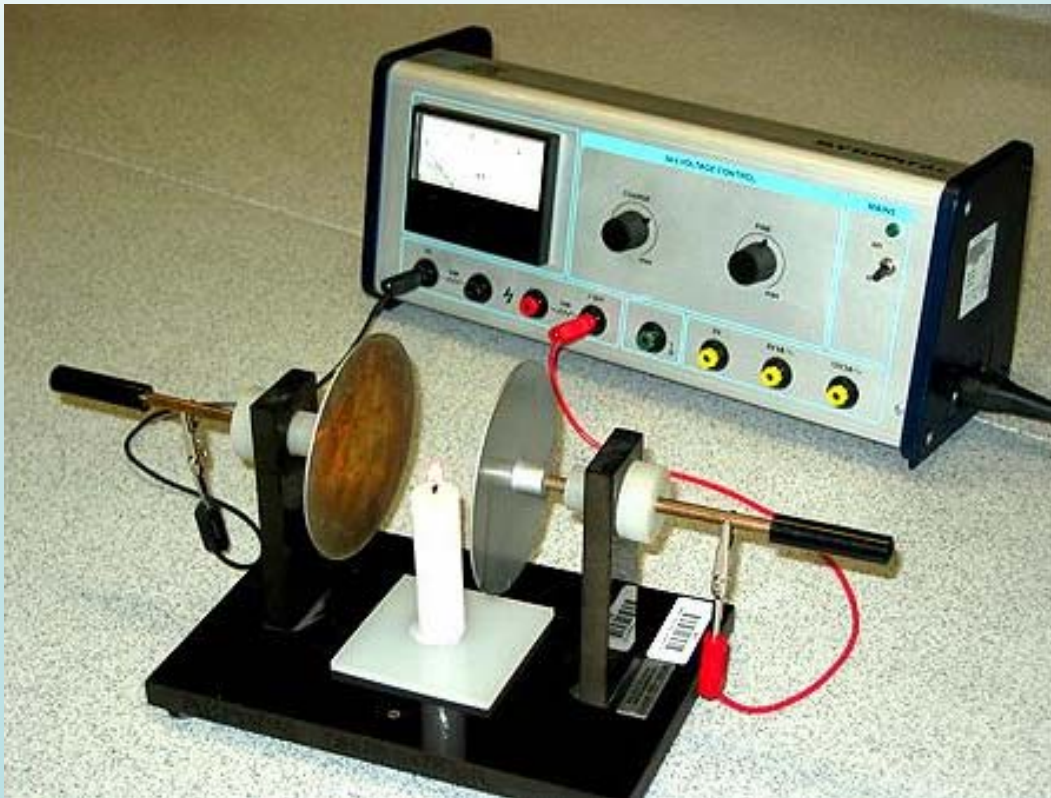
A M Starik: Formation of charged nanoparticles in hydrocarbon flames: principal mechanisms, *Plasma Sources Sci. Technol.* **17** (2008) 045012

- Ozajstné koncentrácie a doby života iónov v  $\text{C}_2\text{H}_4$  plameni
- Možno tu je návod na odpoveď na kmitanie plameňa – rôzna veľkosť dominantných + a - iónov



# Skúste plameň sviečky

- Studenší ale nedokonalejšie spaľovanie, ťažšie uhľovodíky – možno vzniká viac iónov ako v  $\text{CH}_4$  plameni
- Podľa [http://www.practicalphysics.org/go/Experiment\\_289.html](http://www.practicalphysics.org/go/Experiment_289.html) sa plameň rozdelí na dve časti



# Ako riešiť úlohu

- Začnite experimentálne
- Bunsenov horák – otvorené-zavreté nasávanie
  - Zemný plyn
  - Iné palivá (propán-bután) – môže ozrejmiť úlohu iónov
  - Pozor na požiar, popáleniny!
  - Prípadne sviečka
- Nabité platne
  - Potrebujete vysoké napätie  $>10$  kV – van der Graaf
  - Platne sa budú zohrievať, hlavne hore
  - Merajte prúd v závislosti od paliva, typu plameňa, napätia, ...
  - Pozor na napätie, popáleniny, topenie izolácie káblov
- Foto, video
  - Správne expozície, aby to bolo vidieť
  - Spomalenie videa - meranie  $f$  kmitania

# Ako postupovať ďalej

- Zistiť kedy to kmitá
- Pokúsiť sa teoreticky popísať kmitanie cez pohyblivosť iónov
- Veľa, **veľa** študovať literatúru – o spaľovaní, plameňoch, ionizovanom plyne, plazme, ....
- Zamerať sa na ióny – tie sú v úlohe kľúčové, elektróny uletia príliš rýchlo
- Je to na stredoškolskej úrovni veľmi ťažká úloha – kto jav pekne experimentálne preukáže a teoreticky popíše tak, aby to korelovalo s experimentom a bolo to aspoň zhruba správne, má u mňa 10!

**Ďakujem za pozornosť !**