

**F4110**  
**Fyzika atomárních soustav**  
**letní semestr 2005 - 2006**

**I.**  
**Měřítko kvantového světa**

**KOTLÁŘSKÁ 23. ÚNORA 2006**

# Úvodem

- Dnes: čekám, až trochu postoupí hlavní přednášky
- Odvolám se na znalosti středoškolské a předchozí části Kursu
- Cíl ... orientace v nepřehledné oblasti atomárních soustav
- Fundamentální konstanty a zavedení přirozených jednotek
- Rozměrové a jiné kvalitativní úvahy
- Zamyšlení nad Bičákovým diagramem velikostí a hmotností objektů

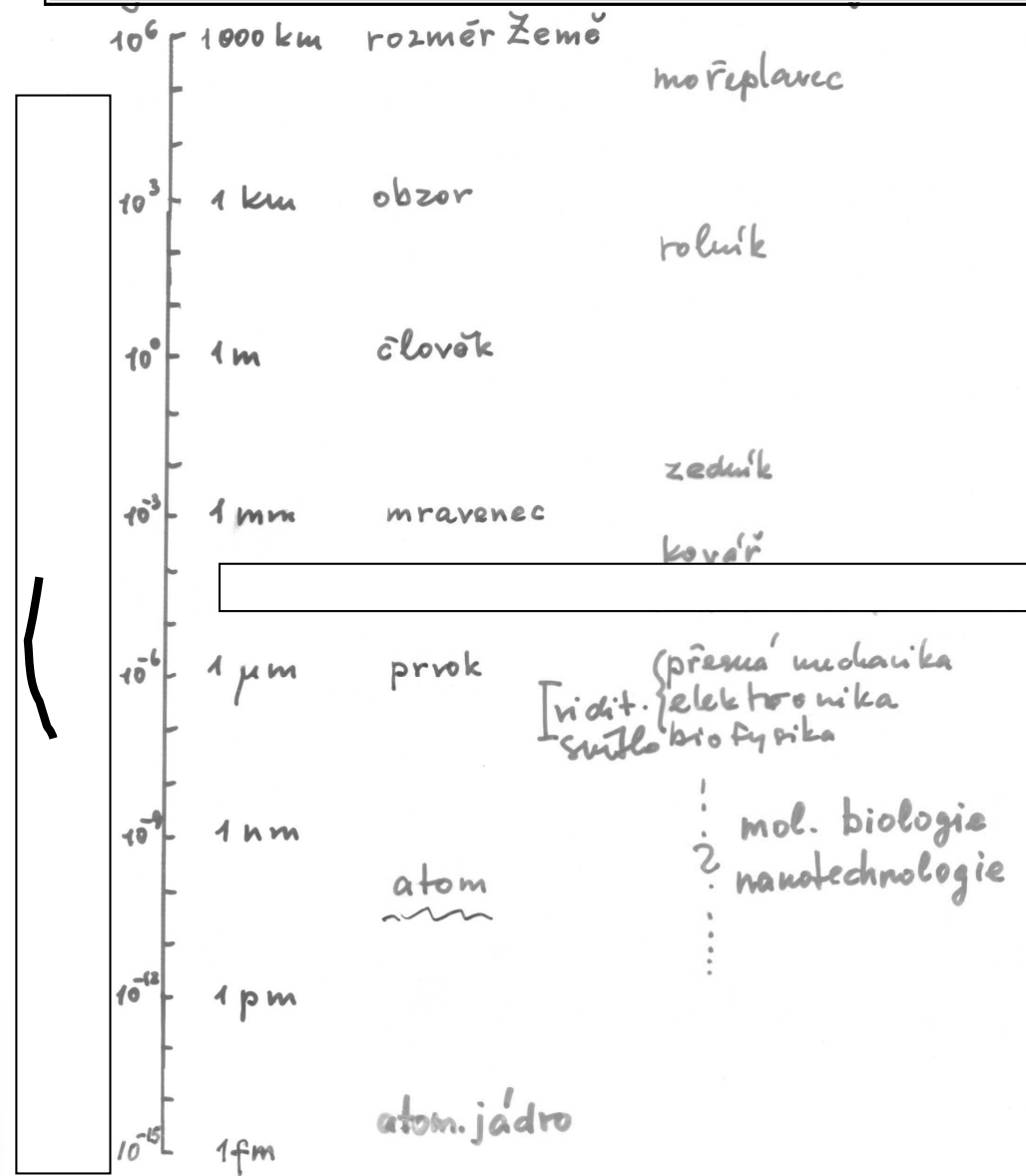
## *Klasický a kvantový svět*

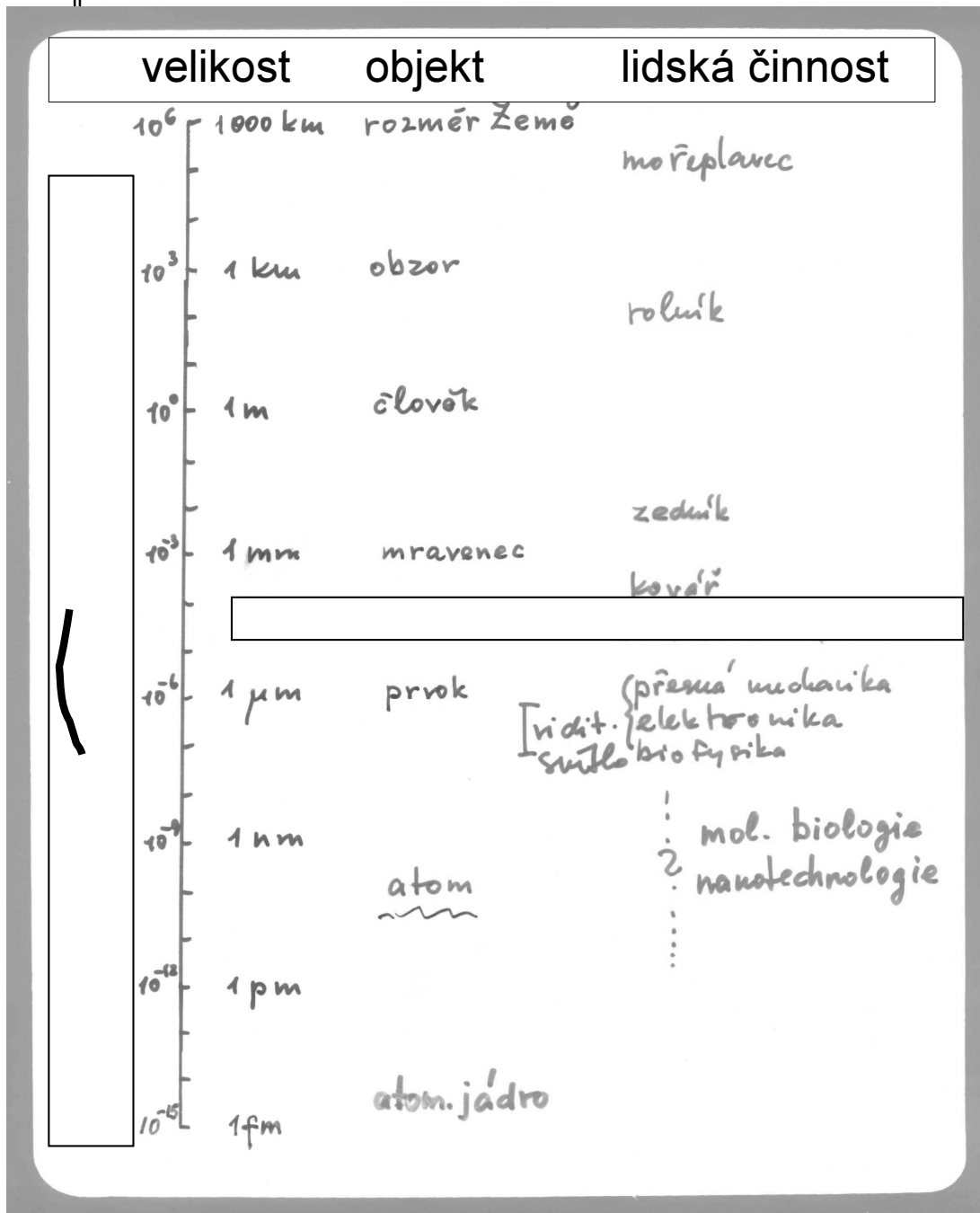
Kvantové zákony ovládají titěrné mikroobjekty,  
jako jsou atomy a molekuly.

V každodenním životě však kvantové efekty  
zpravidla nepozorujeme.

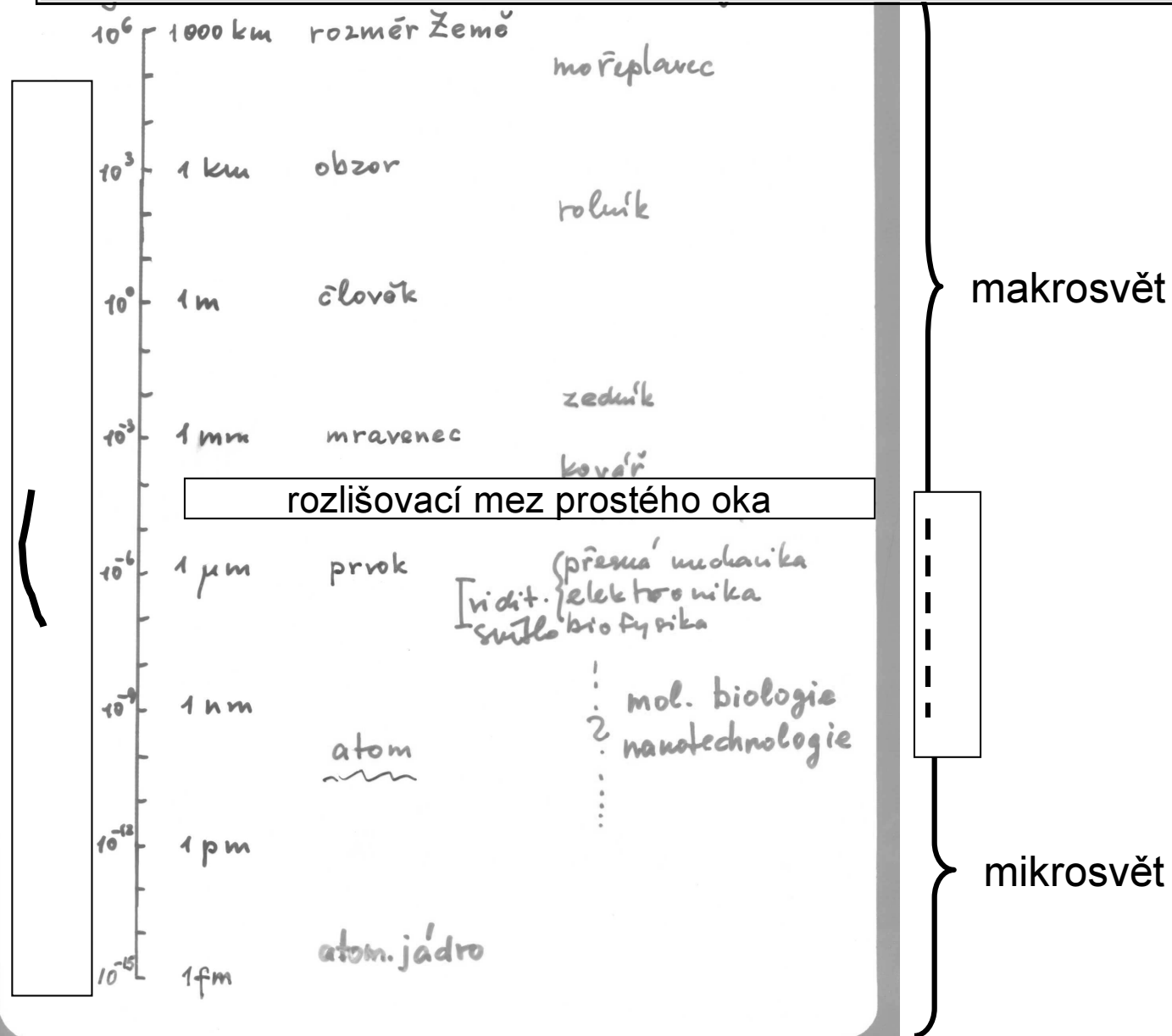
Kde je rozhraní obou světů a jak je můžeme  
rozpoznat a charakterisovat?

# Logaritmická škála velikosti objektů

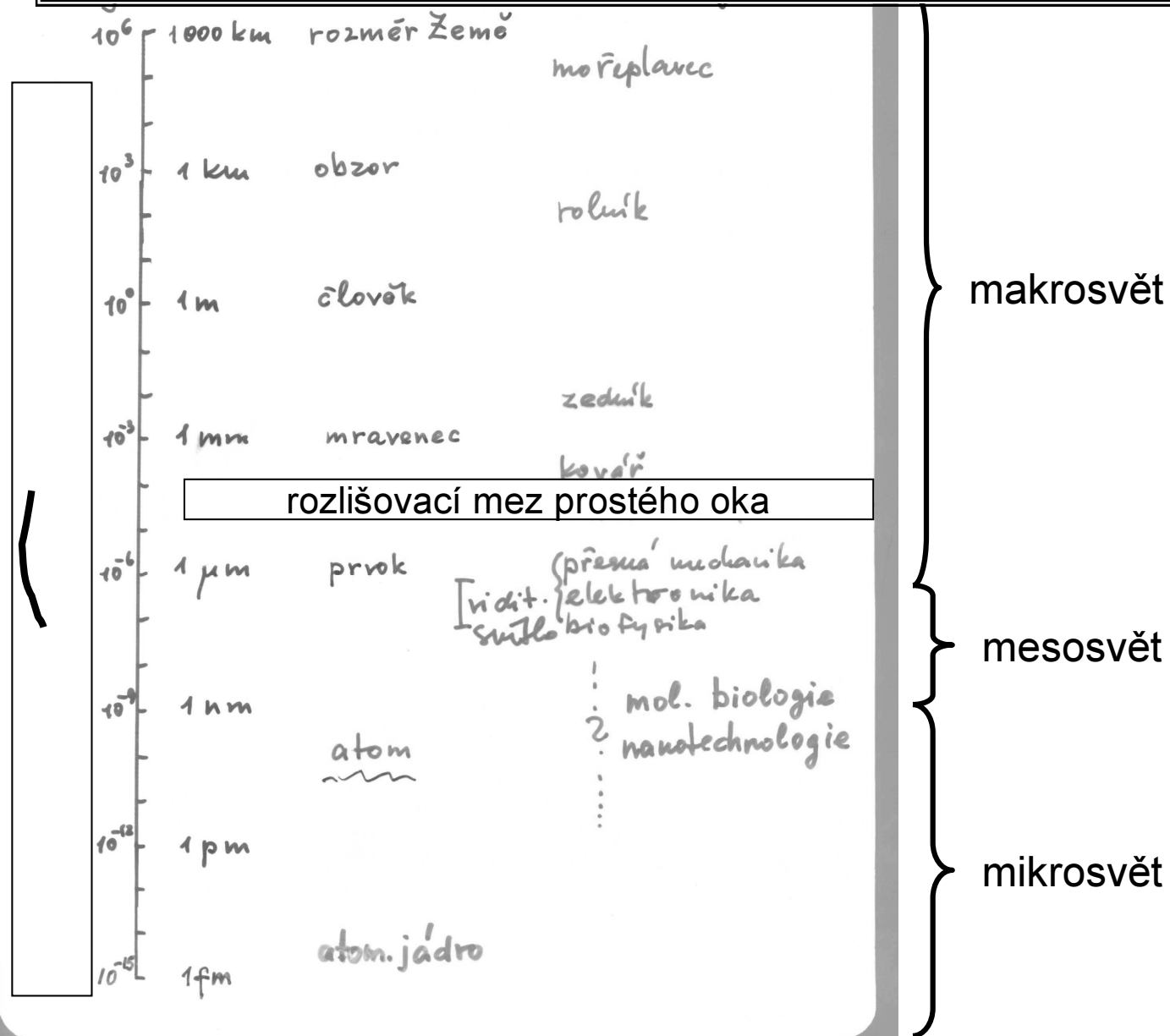




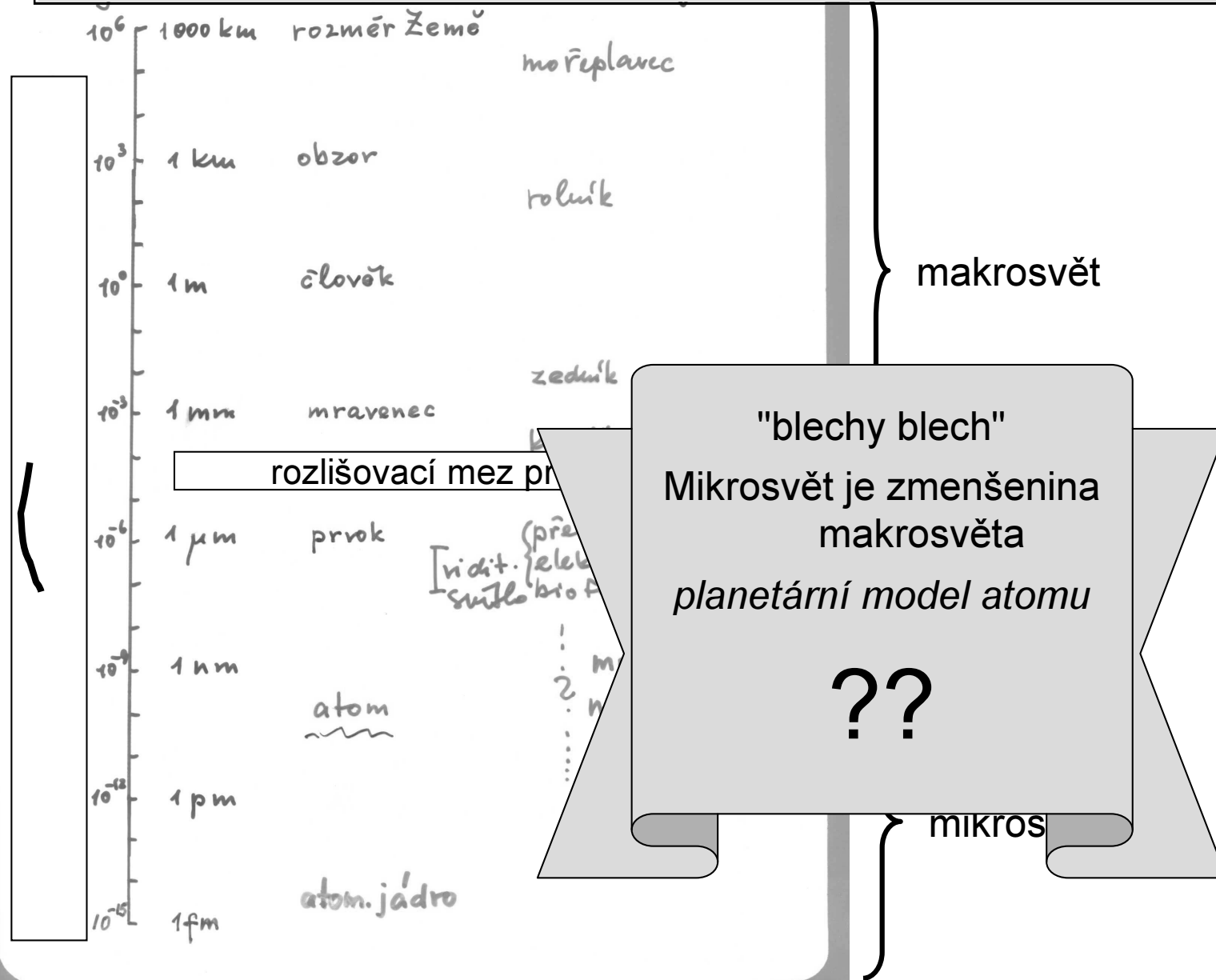
# Logaritmická škála velikosti objektů



# Logaritmická škála velikosti objektů

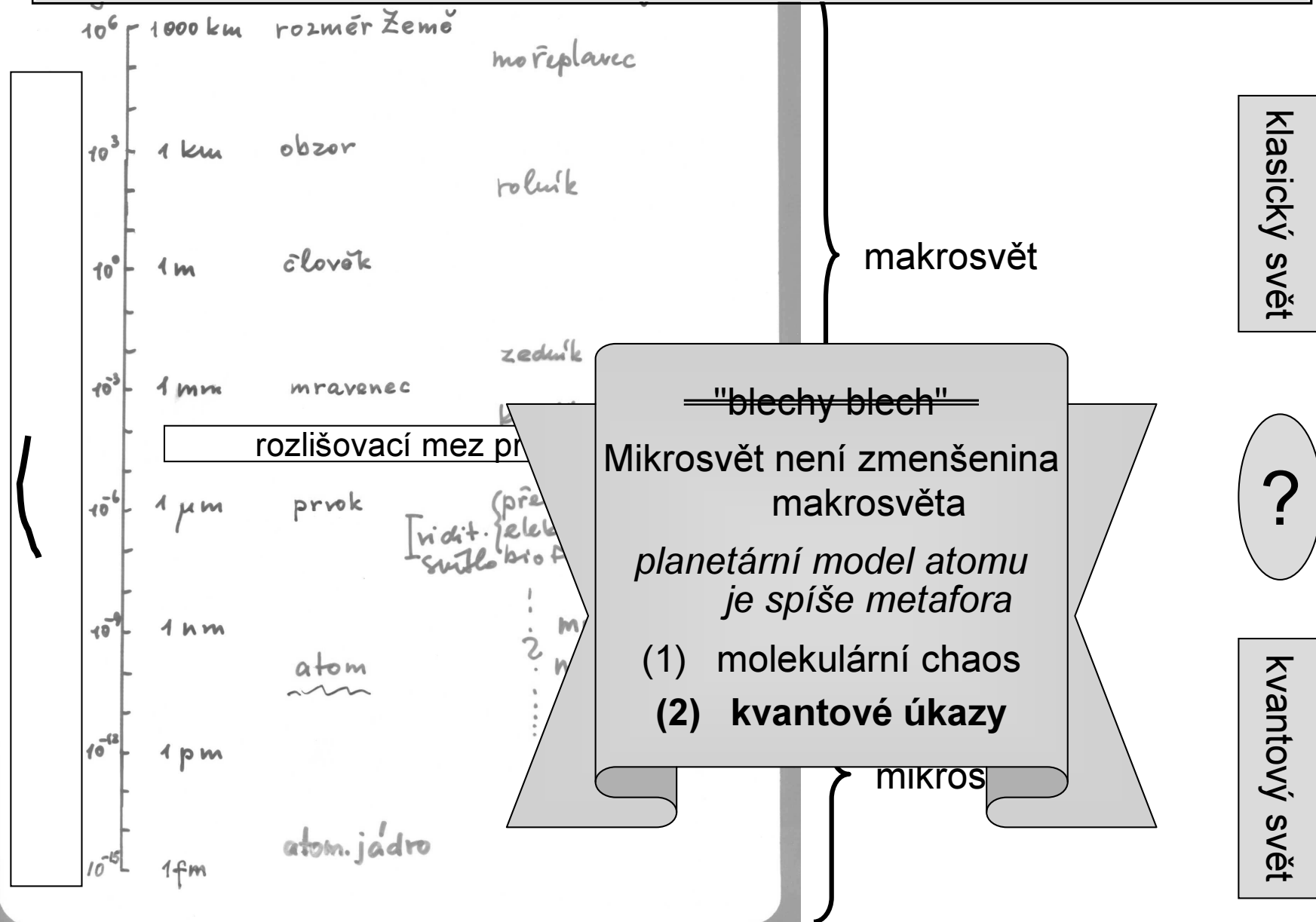


# Logaritmická škála velikosti objektů





# Logaritmická škála velikosti objektů



# Logaritmická škála velikosti objektů

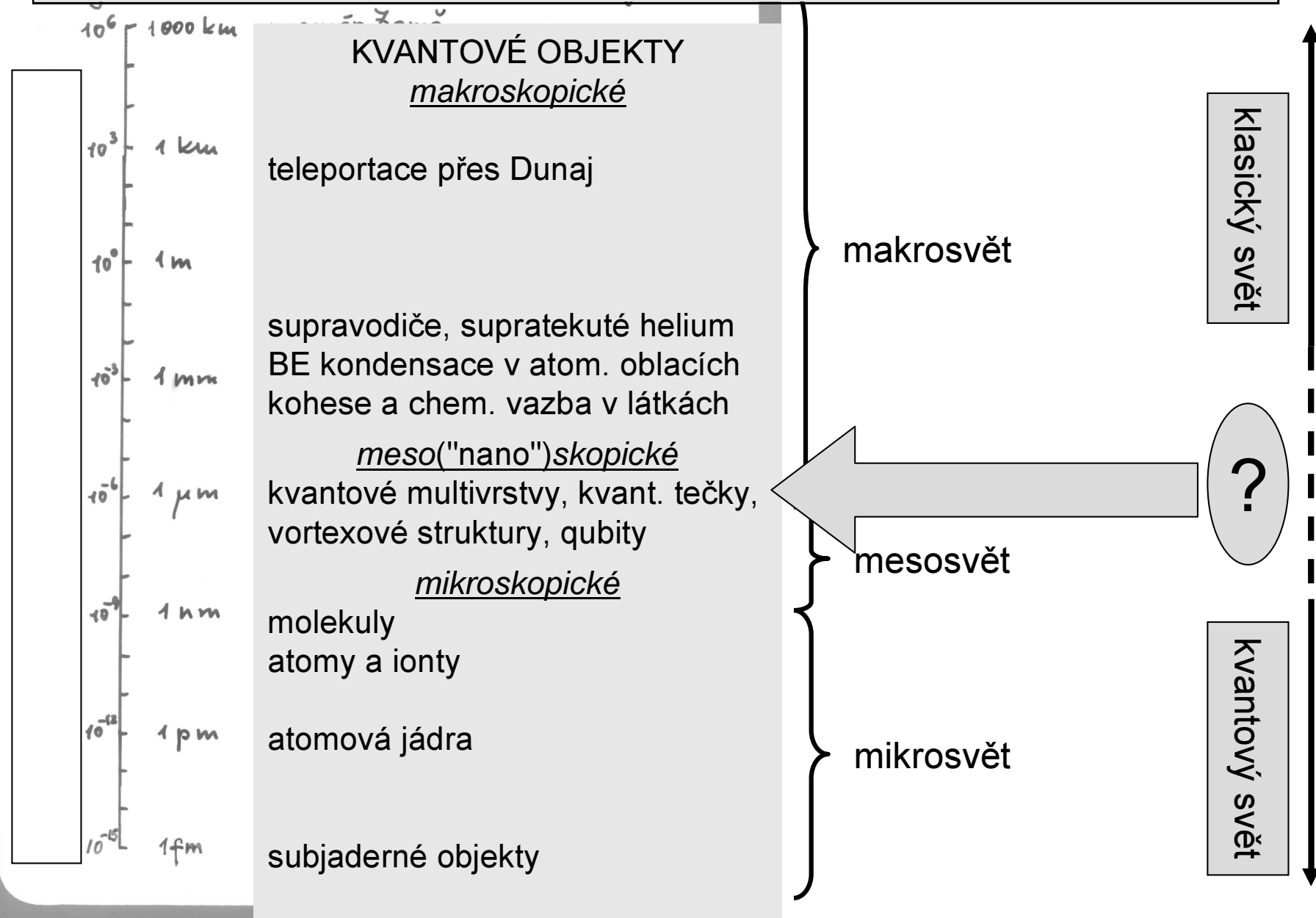




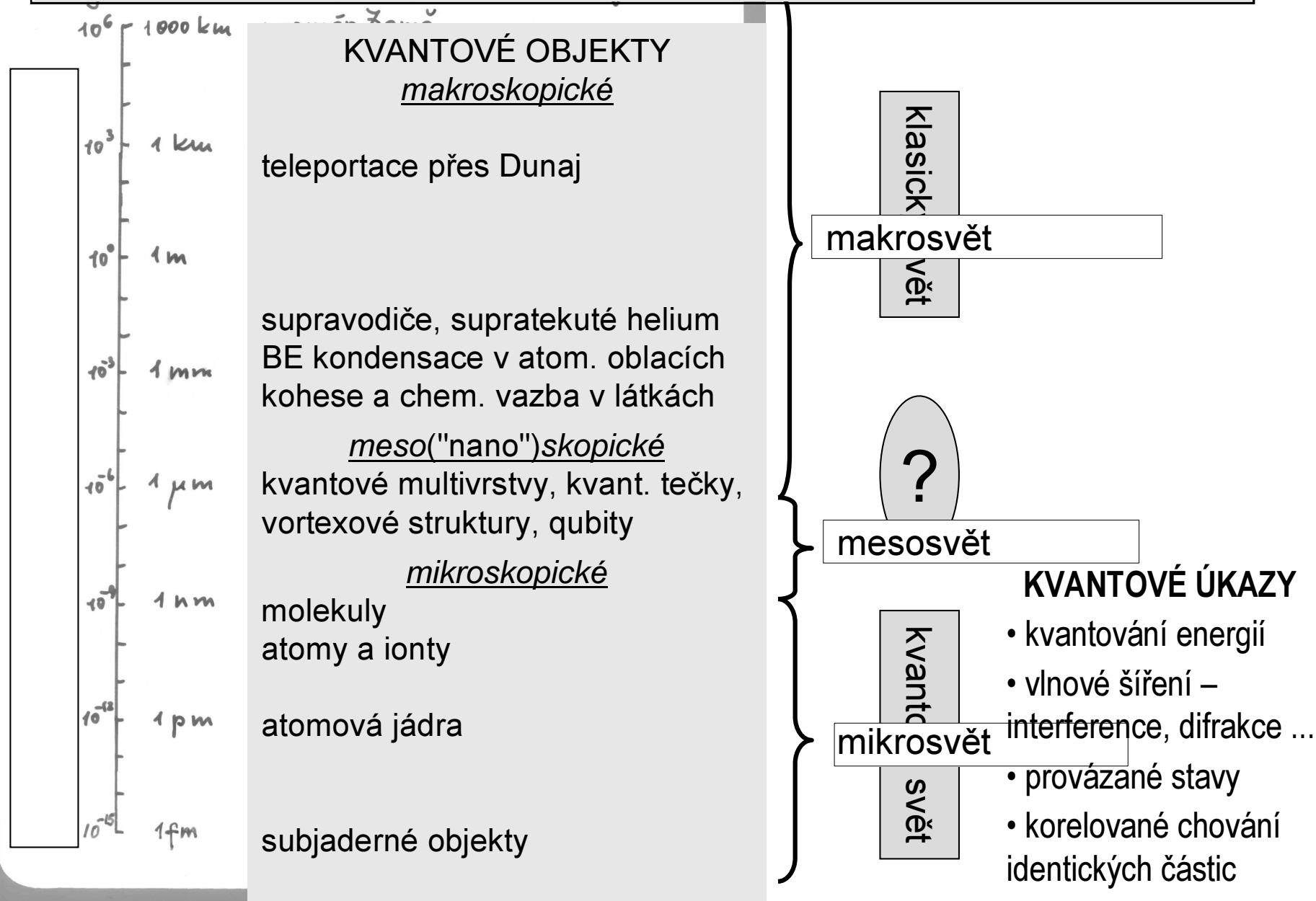
# Logaritmická škála velikosti objektů



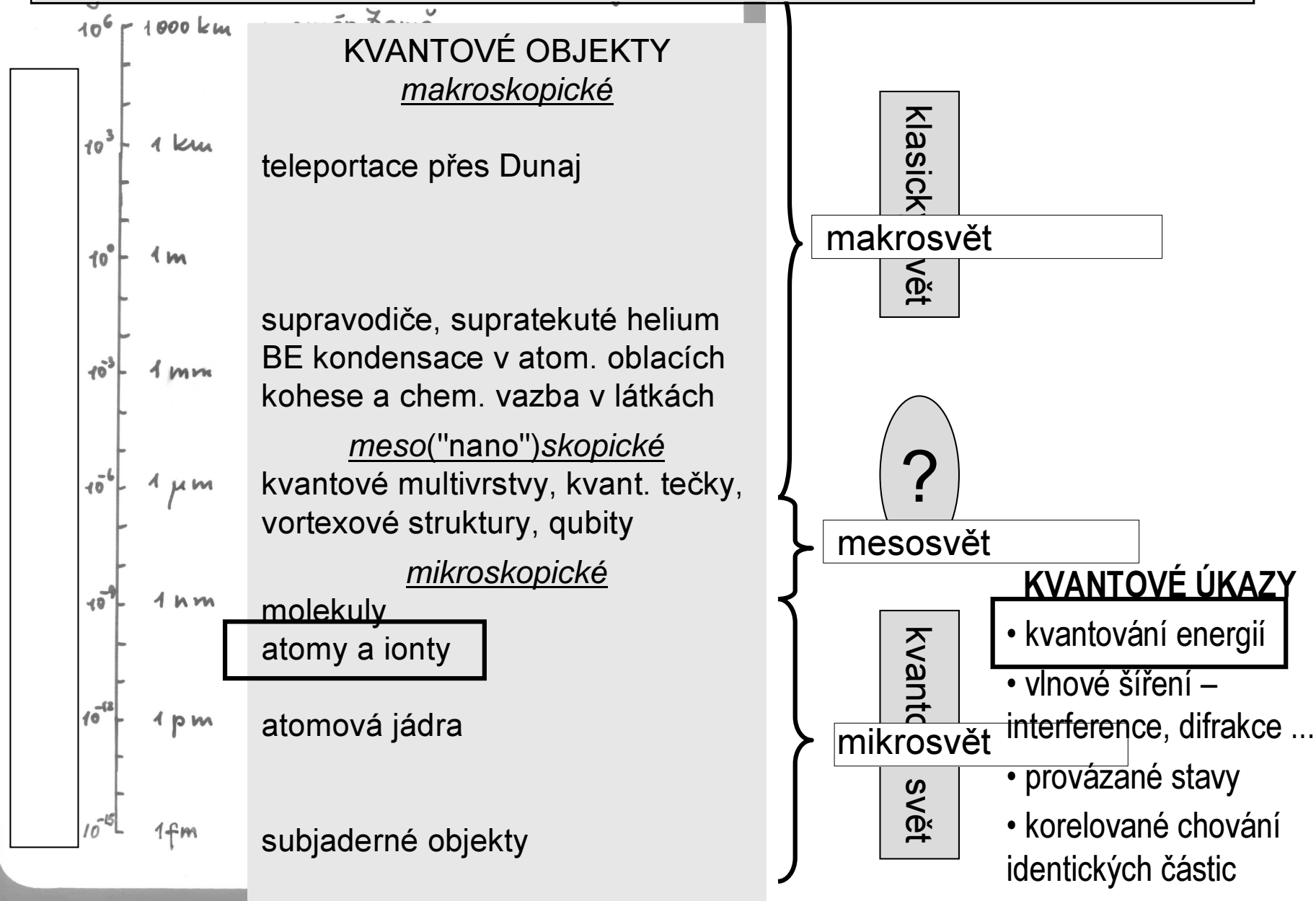
# Logaritmická škála velikosti objektů



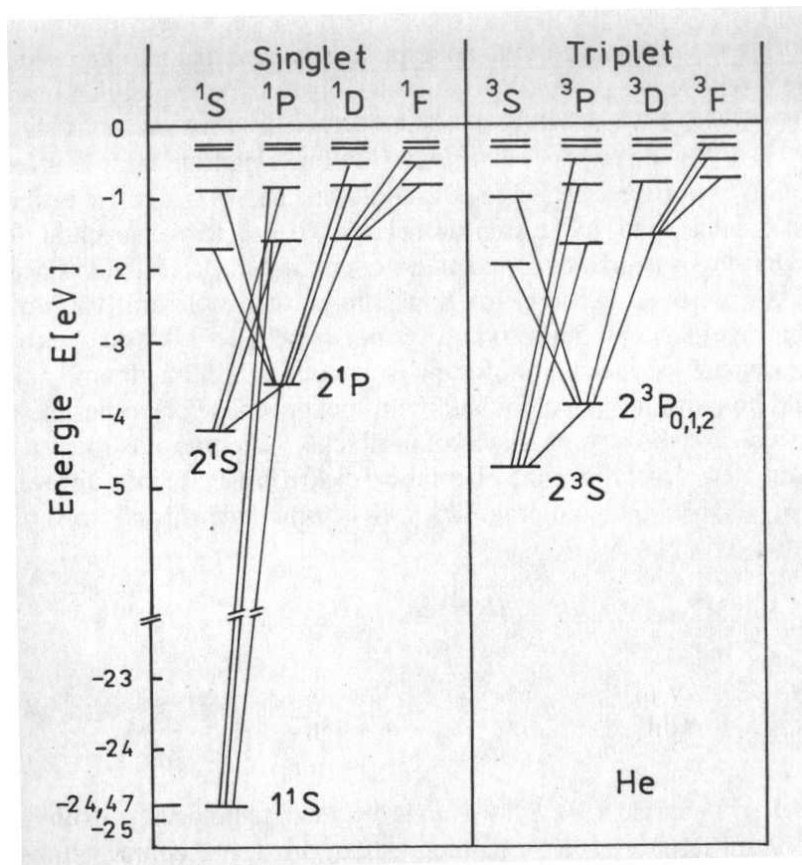
# Logaritmická škála velikosti objektů



# Logaritmická škála velikosti objektů



# Kvantování energie v atomu (helia)



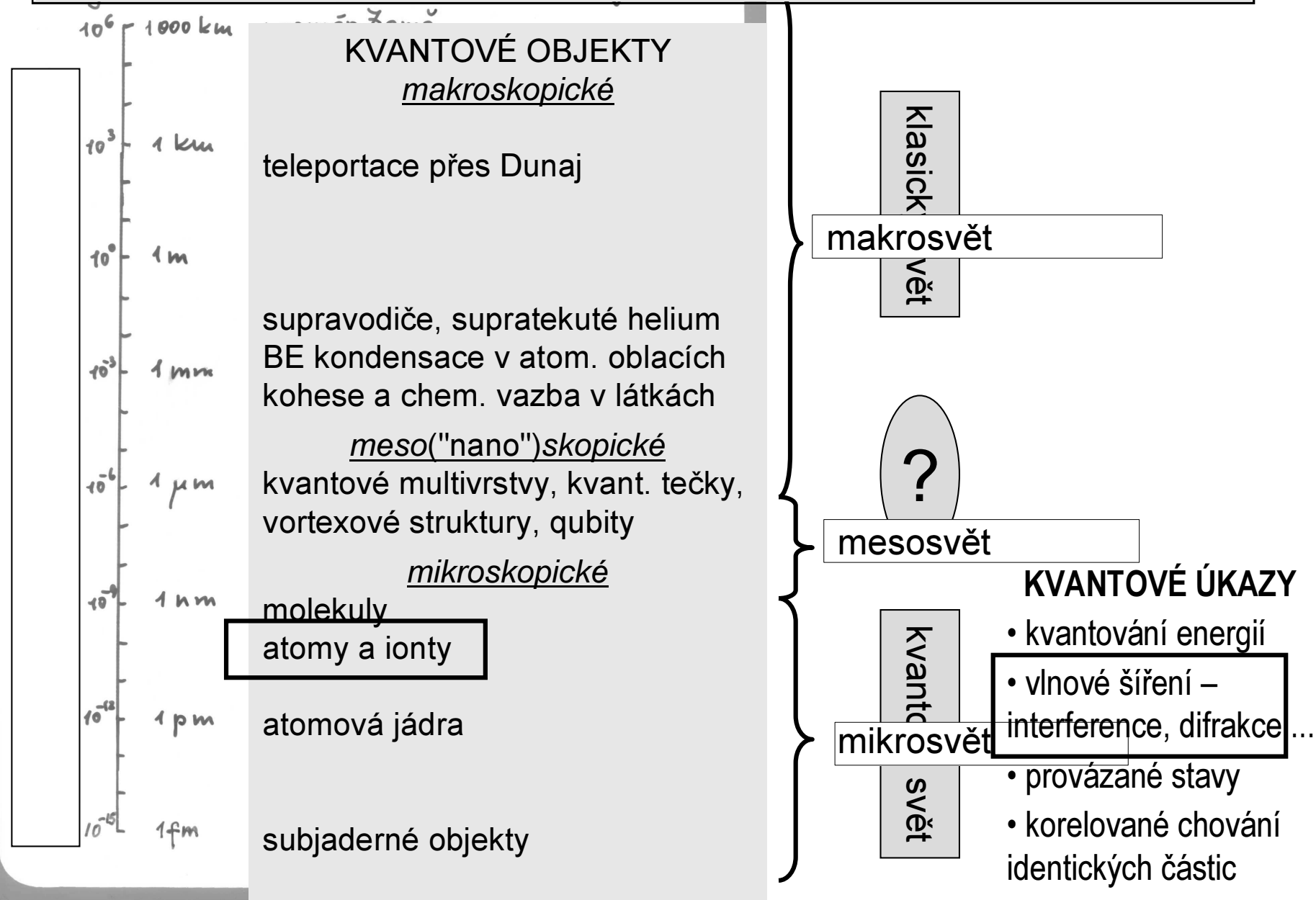
Bohrova podmínka

$$h\nu = E_1 - E_2$$

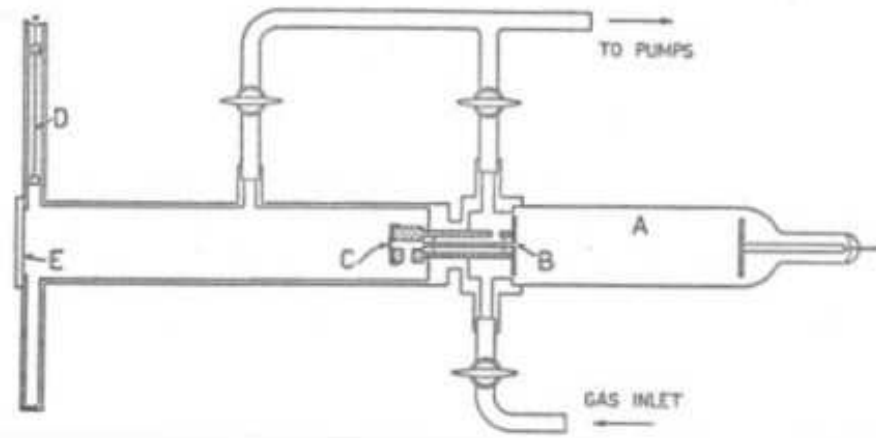
dává fotony s určitou energií,  
čili ostré spektrální linie



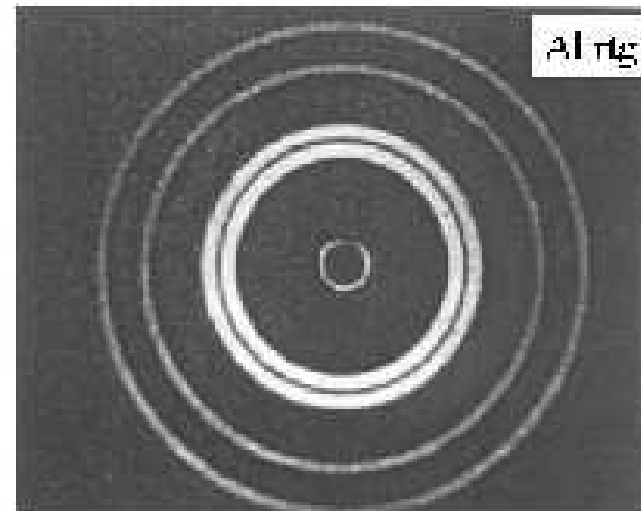
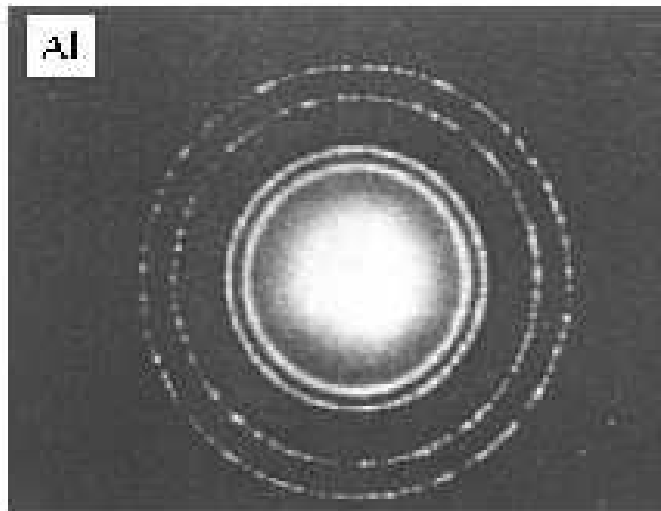
# Logaritmická škála velikosti objektů



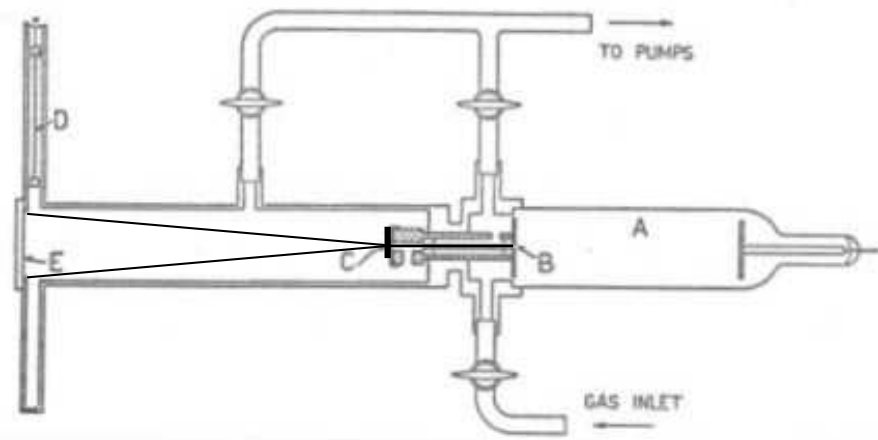
# *Difrakce rychlých elektronů na hliníkové folii*



G.P. Thomson 1927



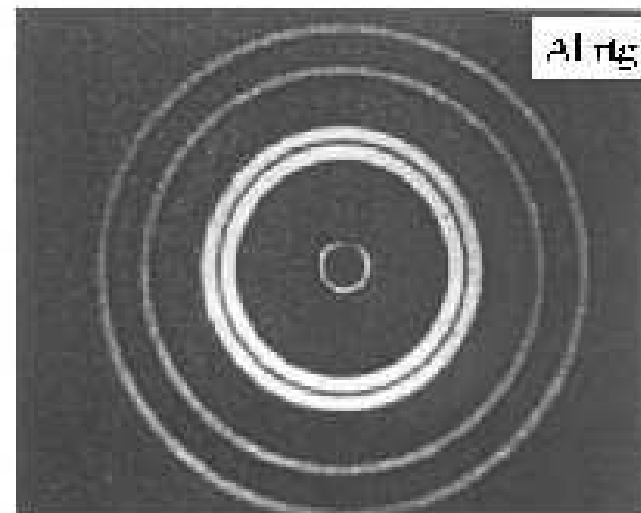
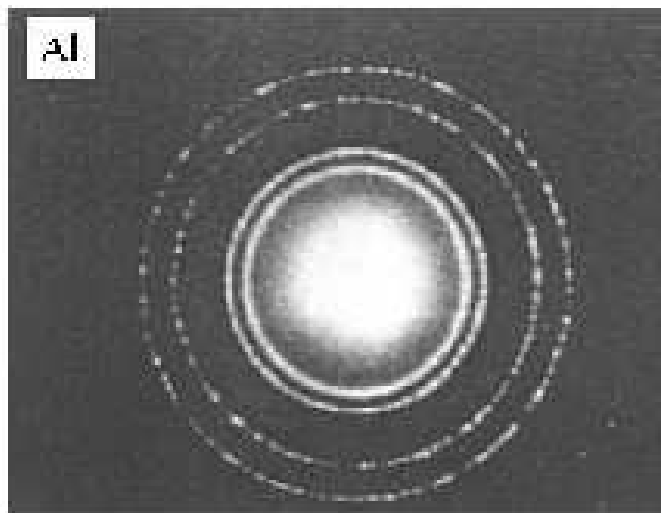
# *Difrakce rychlých elektronů na hliníkové folii*



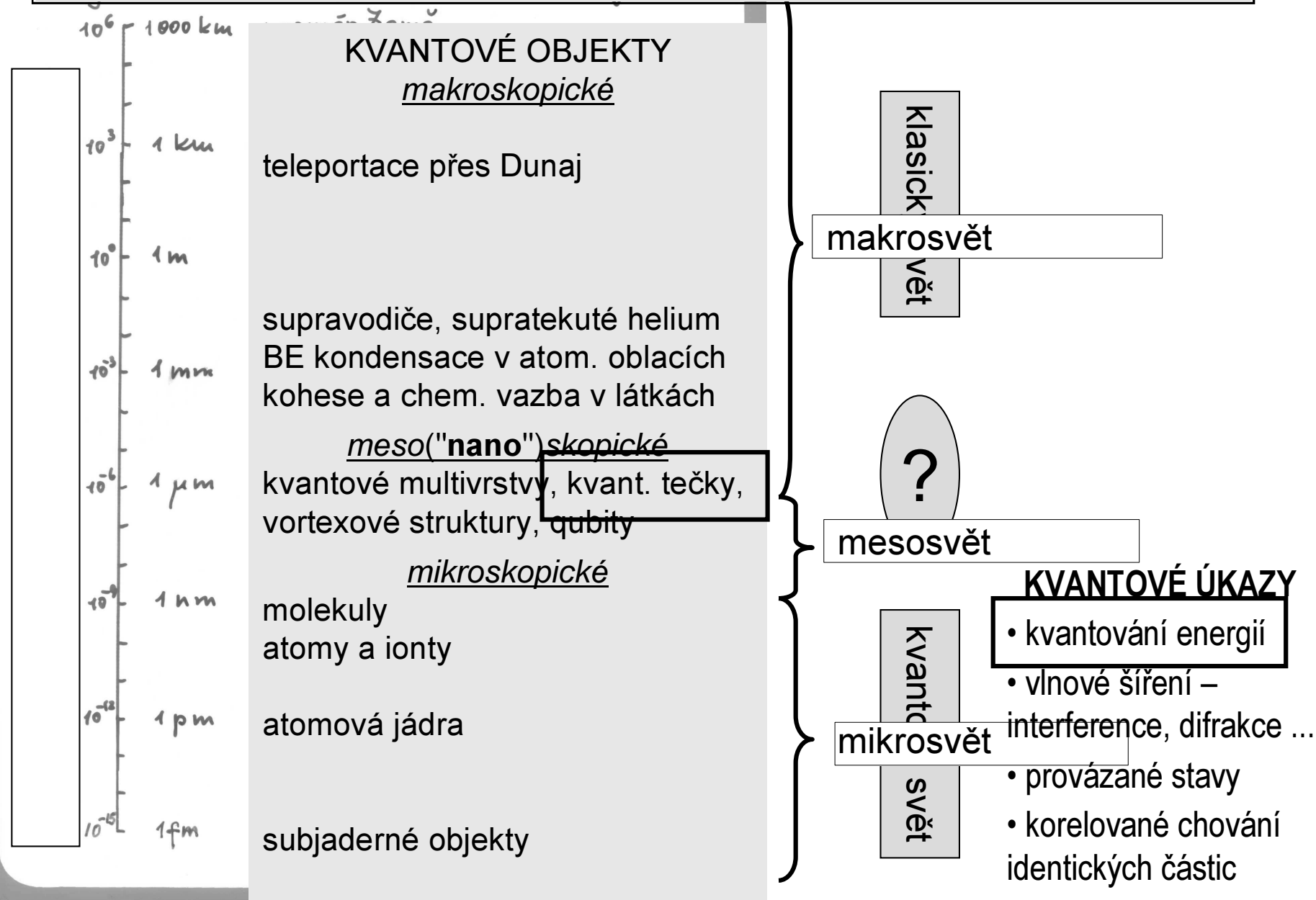
G.P. Thomson 1927

elektrony

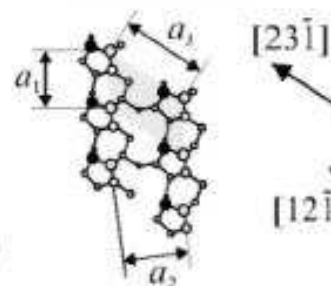
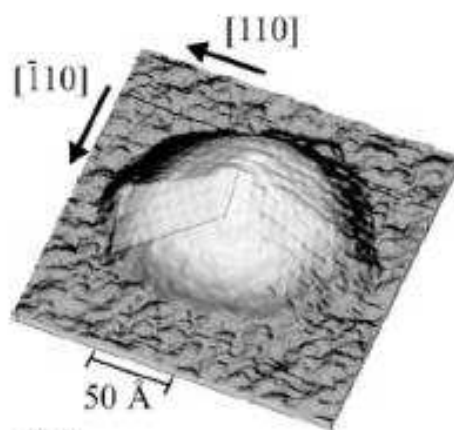
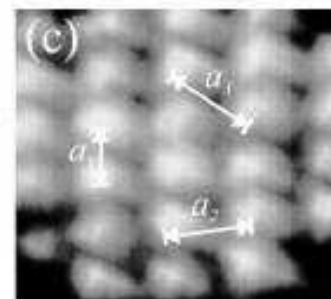
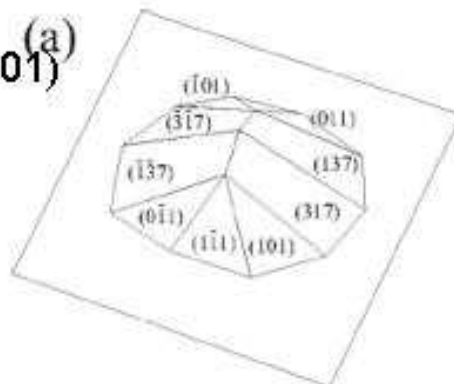
Röntgenovy paprsky



# Logaritmická škála velikosti objektů



Kvantové tečky InAs na GaAs (001)  
(STM)



$$a_1 = 6,5 \pm 0,1 \text{ \AA}$$

$$a_2 = 9,0 \pm 0,3 \text{ \AA}$$

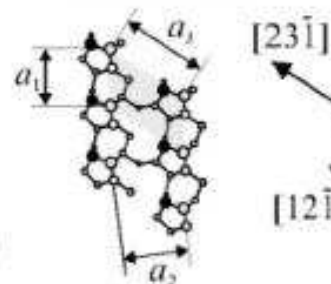
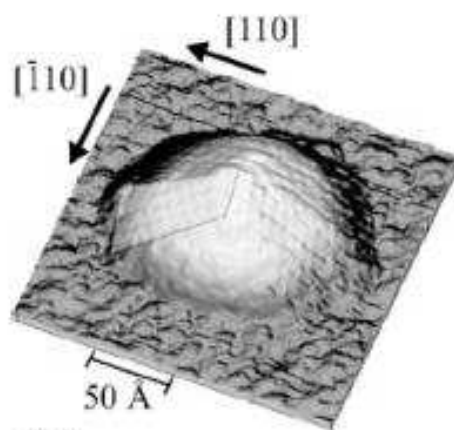
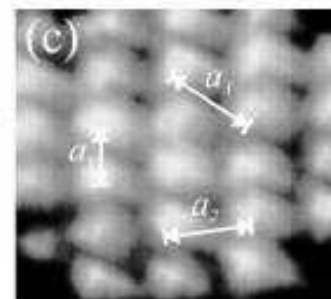
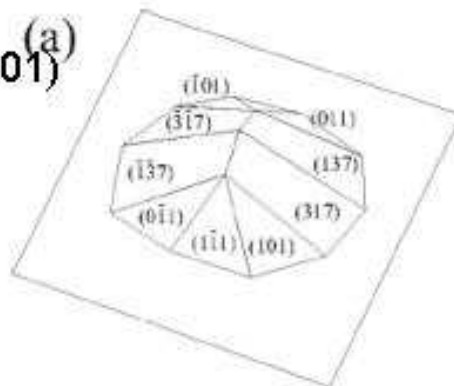
$$a_3 = 10,5 \pm 0,2 \text{ \AA}$$

$$\angle(a_1, a_2) = 82,4^\circ \pm 0,7^\circ$$

Kvantové tečky InAs na GaAs (001)  
(STM)

UMĚLÉ ATOMY  
(dimense 0)

průměr tečky 10 nm  
průměr atomu 0.3 nm



$$a_1 = 6,5 \pm 0,1 \text{ \AA}$$

$$a_2 = 9,0 \pm 0,3 \text{ \AA}$$

$$a_3 = 10,5 \pm 0,2 \text{ \AA}$$

$$\angle(a_1, a_2) = 82,4^\circ \pm 0,7^\circ$$

*Science* 3 February 2006:  
Vol. 311. no. 5761, pp. 636 - 639

### Optical Signatures of Coupled Quantum Dots

E. A. Stinaff,<sup>1</sup> M. Scheibner,<sup>1</sup> A. S. Bracker,<sup>1</sup> I. V. Ponomarev,<sup>1</sup> V. L. Korenev,<sup>2</sup> M. E. Ware,<sup>1</sup> M. F. Doty,<sup>1</sup> T. L. Reinecke,<sup>1</sup> D. Gammon<sup>1\*</sup>

An asymmetric pair of coupled InAs quantum dots is tuned into resonance by applying an electric field so that a single hole forms a coherent molecular wave function. The optical spectrum shows a rich pattern of level anticrossings and crossings that can be understood as a superposition of charge and spin configurations of the two dots. Coulomb interactions shift the molecular resonance of the optically excited state (charged exciton) with respect to the ground state (single charge), enabling light-induced coupling of the quantum dots. This result demonstrates the possibility of optically coupling quantum dots for application in quantum information processing.

Science 3 February 2006: **AKTUÁLNÍ**  
Vol. 311. no. 5761, pp. 636 - 639

### Optical Signatures of Coupled Quantum Dots

E. A. Stinaff,<sup>1</sup> M. Scheibner,<sup>1</sup> A. S. Bracker,<sup>1</sup> I. V. Ponomarev,<sup>1</sup> V. L. Korenev,<sup>2</sup> M. E. Ware,<sup>1</sup> M. F. Doty,<sup>1</sup> T. L. Reinecke,<sup>1</sup> D. Gammon<sup>1\*</sup>

An asymmetric pair of coupled InAs quantum dots is tuned into resonance by applying an electric field so that a single hole forms a coherent molecular wave function. The optical spectrum shows a rich pattern of level anticrossings and crossings that can be understood as a superposition of charge and spin configurations of the two dots. Coulomb interactions shift the molecular resonance of the optically excited state (charged exciton) with respect to the ground state (single charge), enabling light-induced coupling of the quantum dots. This result demonstrates the possibility of optically coupling quantum dots for application in quantum information processing.

**APLIKACE**



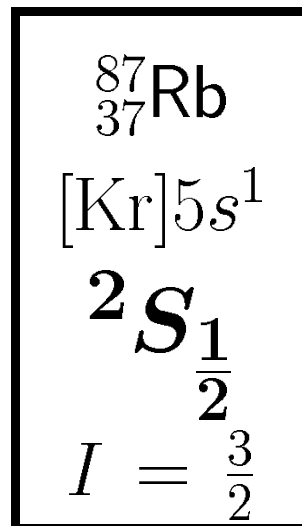
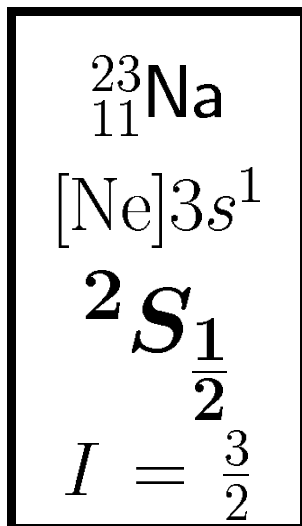


# *Bose-Einsteinova kondensace atomů v pastech*

Obláček atomů (alkalických kovů) za extrémně nízkých teplot  
přejde do zvláštního stavu – BE kondensátu, ve kterém  
všechny atomy se pohybují naprosto shodně, koherentně a  
dohromady vytvoří makroskopickou vlnovou funkci

*objeveno 1995*

*Nobelova cena 2001*



## **Rubidium**

37 electrons      *total electron spin*  $S = \frac{1}{2}$

37 protons  
50 neutrons      } *total nuclear spin*  $I = \frac{3}{2}$

*total spin of the atom*

$$\vec{F} = \vec{S} + \vec{I}$$

$$\boxed{F = |S - I|, \dots, S + I = 1, 2}$$

# *Bose-Einsteinova kondensace atomů v pastech*

Příbuzný jev – supratekutost  
znám v kapalném heliu od 30tých let

## PŘIBLIŽNÉ ÚDAJE KRITICKÝCH TEPLŮT

| system    | $M$ | $n$                | $T_C$        |
|-----------|-----|--------------------|--------------|
| He liquid | 4   | $2 \times 10^{28}$ | 1.47 K       |
| Na trap   | 23  | $2 \times 10^{20}$ | 1.19 $\mu$ K |
| Rb trap   | 87  | $2 \times 10^{17}$ | 3.16 nK      |

# *Bose-Einsteinova kondensace atomů v pastech*

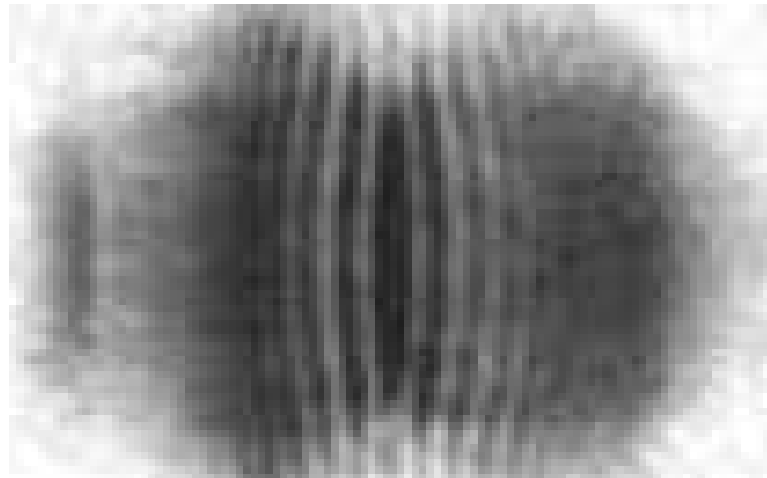
Atomy sodíku vytvářejí makroskopickou vlnovou funkci

Experimentální důkaz:

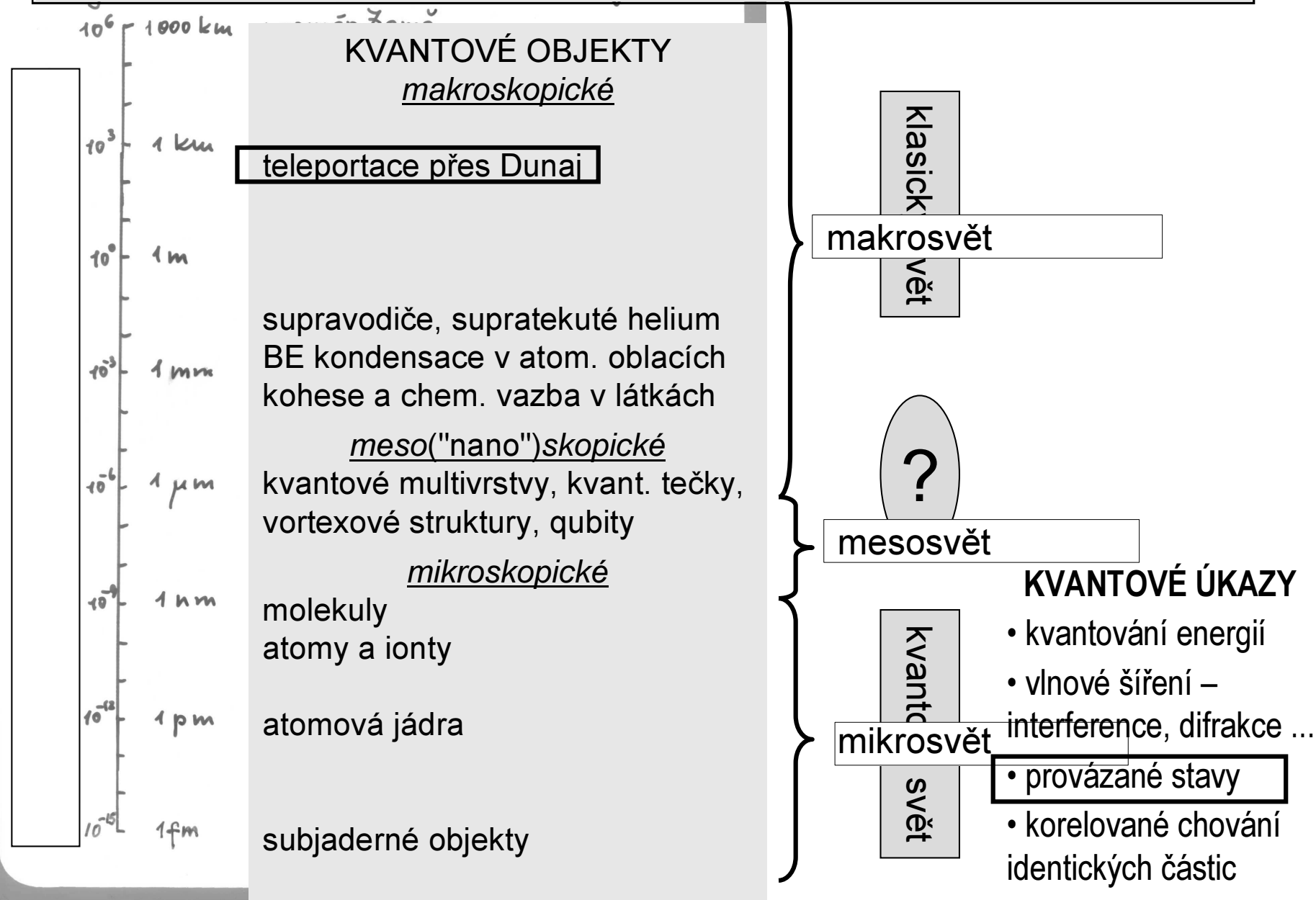
Dvě části obláčku rozdělené a opět se prolínající spolu interferují.

Vlnová délka v řádu desetin milimetru

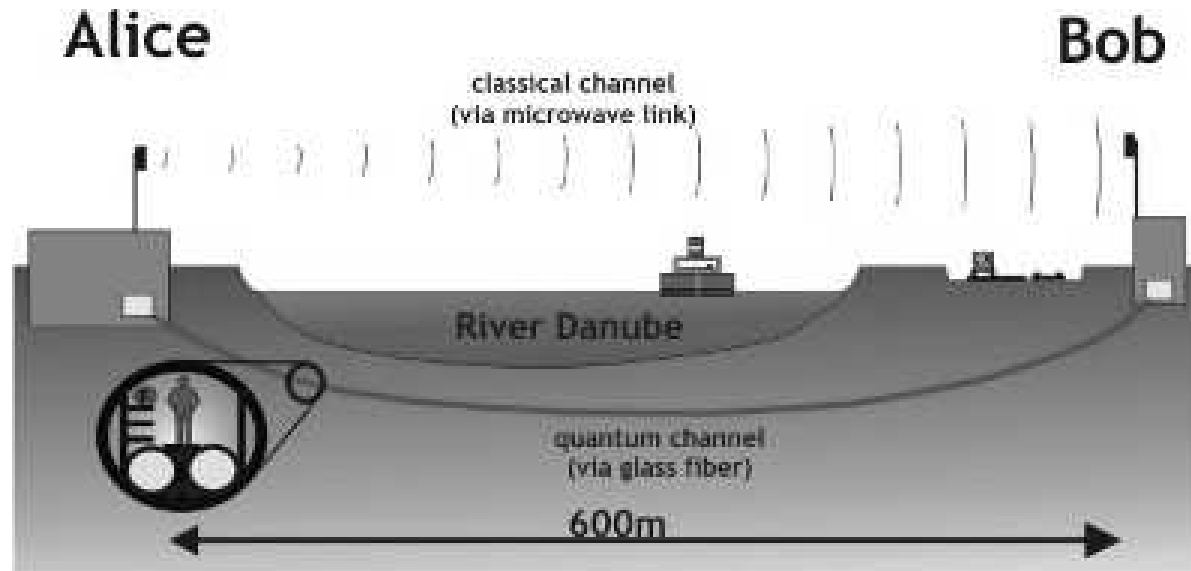
*experiment ve skupině Ketterle a spol.*



# Logaritmická škála velikosti objektů



# *Kvantová teleportace fotonů*



R. Ursin et.al: *Quantum Teleportation link across the Danube*, Nature **430**, 849 (2004)

## *Planckova konstanta*

Samotná velikost objektů není tedy rozhodující pro jejich kvantové chování.

Obecné kritérium je spíše, jak důležitá je pro daný problém Planckova konstanta.

## *Tři klíčové teorie (pro atomární systémy)*

Nepůjdeme-li na sub-atomární úroveň,  
jsou pro popis fyzikálního světa klíčové tři teorie  
a ty mají jako svůj symbol tři universální konstanty

**G** Klasická mechanika a teorie gravitace

*Gravitační zákon*

$$F = -\frac{Gm_1m_2}{r_{12}^2}$$



## *Tři klíčové teorie (pro atomární systémy)*

Nepůjdeme-li na sub-atomární úroveň,  
jsou pro popis fyzikálního světa klíčové tři teorie  
a ty mají jako svůj symbol tři universální konstanty

**G** Klasická mechanika a teorie gravitace

**c** Teorie elektromagnetického pole  
*Maxwellovy rovnice, vlnová rovnice*

$$\partial_{tt}\mathbf{E} - c^2\Delta\mathbf{E} = \mathbf{0}$$

## *Tři klíčové teorie (pro atomární systémy)*

Nepůjdeme-li na sub-atomární úroveň,  
jsou pro popis fyzikálního světa klíčové tři teorie  
a ty mají jako svůj symbol tři universální konstanty

*G*

Klasická mechanika a teorie gravitace

*c*

Teorie elektromagnetického pole

*ħ*

Kvantová teorie

*Komutační relace, Schrödingerova rovnice*

$$[x, p] = i\hbar$$

$$i\hbar\partial_t\psi = H\psi$$

# Tři klíčové teorie (pro atomární systémy)

Nepůjdeme-li na sub-atomární úroveň,  
jsou pro popis fyzikálního světa klíčové tři teorie  
a ty mají jako svůj symbol tři universální konstanty

$G$  Klasická mechanika a teorie gravitace

$c$  Teorie elektromagnetického pole

$\hbar$  Kvantová teorie  
*Komutační relace, Schrödingerova rovnice*

$$[x, p] = i\hbar$$

$$i\hbar\partial_t\psi = H\psi$$

O této trojici za chvíli více

# *Planckova konstanta*

$$\hbar \approx 1,05 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

$$1,05457168(18) \times 10^{-34} \text{ Js} \text{ CODATA recomm. value}$$

# Planckova konstanta

$$\hbar \approx 1,05 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

$$1,05457168(18) \times 10^{-34} \text{ Js} \quad \text{CODATA recomm. value}$$

- hodně malé číslo
- rozměr energie $\times$ čas=akce=délka  $\times$ hybnost=moment hybnosti
- dnes již známo s velkou přesností
- Planck původně zavedl  $h = 2\pi\hbar$

# Planckova konstanta

$$\hbar \approx 1,05 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

$$1,05457168(18) \times 10^{-34} \text{ Js} \quad \text{CODATA recomm. value}$$

- hodně malé číslo
- rozměr energie $\times$ čas=akce=délka  $\times$ hybnost=moment hybnosti
- dnes již známo s velkou přesností
- Planck původně zavedl  $h = 2\pi\hbar$

Více rolí Planckovy konstanty

1. V základních rovnicích  $[x, p] = i\hbar$        $i\hbar\partial_t\psi = H\psi$

# Planckova konstanta

$$\hbar \approx 1,05 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

$$1,05457168(18) \times 10^{-34} \text{ Js} \quad \text{CODATA recomm. value}$$

- hodně malé číslo
- rozměr energie $\times$ čas=akce=délka  $\times$ hybnost=moment hybnosti
- dnes již známo s velkou přesností
- Planck původně zavedl  $h = 2\pi\hbar$

Více rolí Planckovy konstanty

1. V základních rovnicích  $[x, p] = i\hbar$       $i\hbar\partial_t\psi = H\psi$
2. Jako převodní koeficient  $E = \hbar\omega = h\nu$  Planckův vztah

# Planckova konstanta

$$\hbar \approx 1,05 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

$$1,05457168(18) \times 10^{-34} \text{ Js} \quad \text{CODATA recomm. value}$$

- hodně malé číslo
- rozměr energie $\times$ čas=akce=délka  $\times$ hybnost=moment hybnosti
- dnes již známo s velkou přesností
- Planck původně zavedl  $h = 2\pi\hbar$

Více rolí Planckovy konstanty

1. V základních rovnicích  $[x, p] = i\hbar$   $i\hbar\partial_t\psi = H\psi$
2. Jako převodní koeficient  $E = \hbar\omega = h\nu$  Planckův vztah
3. Jako charakteristická mezní veličina  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$  relace neurčitosti



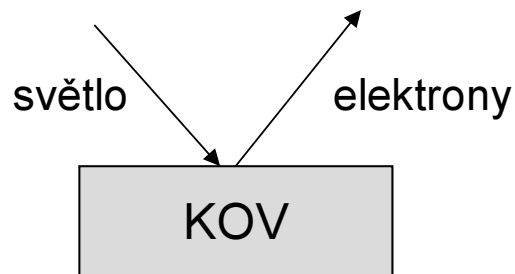
# Planckova konstanta jako převodní koeficient

$$E = \hbar\omega = h\nu \quad \text{Planckův vztah}$$

Překlad mezi jazyky dvou teorií ... most  $Q \leftrightarrow C$

„Fotony světla o frekvenci  $\nu$  mají energii  $E$ “

Tak uvažoval Einstein při vysvětlení **fotoefektu**



elektrony vyletují jen pro  $\nu > \nu_0$

Důvod:  $h\nu_0 \equiv W$  je **výstupní práce elektronu**

foton musí mít energii větší, aby ho vyrval.

*Einstein 1905 ... NP*

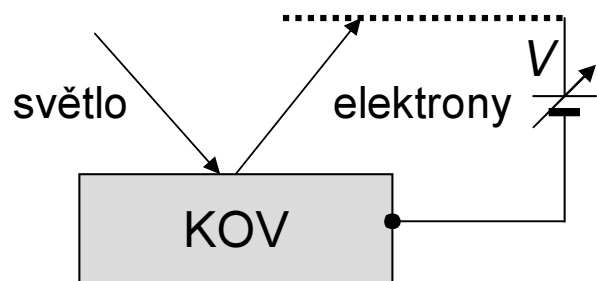
# Planckova konstanta jako převodní koeficient

$$E = \hbar\omega = h\nu \quad \text{Planckův vztah}$$

Překlad mezi jazyky dvou teorií ... most Q $\leftrightarrow$ C

„Fotony světla o frekvenci  $\nu$  mají energii  $E$ “

Tak uvažoval Einstein při vysvětlení **fotoefektu**



elektrony vyletují jen pro  $\nu > \nu_0$

Důvod:  $h\nu_0 \equiv W$  je **výstupní práce elektronu**

foton musí mít energii větší, aby ho vyrval.

*Einstein 1905 ... NP*

Experiment zejména *Lenard .... NP*

Určení energie elektronu ... **brzdný potenciál**

$$E_{\text{kin}} = h\nu - W = e \cdot V$$

elektronvolt

## *Odbočka: děsivé hodnoty a šikovní jednotky*

Uvažme, že

$$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\hbar = 1.05 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

Je rozumné si zavést jednotky atomistice přiměřené.

Např.

nm, eV, fs

1 eV je energie, kterou elementární náboj získá při

průchodu potenciálním rozdílem 1 V,

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Pak vyjde neobyčejně šikovně

$$\hbar = 0.66 \text{ eVfs}$$

$$m_e = 5.7 \text{ eVfs}^2\text{nm}^{-2}$$

## Odbočka: děsivé hodnoty a šikovní jednotky

Uvažme, že

$$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\hbar = 1.05 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

Je rozumné si zavést jednotky atomistice přiměřené.

Např.

nm, eV, fs

1 eV je energie, kterou elementární náboj získá při

průchodu potenciálním rozdílem 1 V,

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Pak vyjde neobyčejně šikovně

$$\hbar = 0.66 \text{ eVfs}$$

$$m_e = 5.7 \text{ eVfs}^2\text{nm}^{-2}$$

Ještě lepší je přejít k **přirozeným jednotkám**

$$m_e = e = \hbar = 1$$

# Planckova konstanta jako hraniční hodnota

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar \quad \text{relace neurčitosti}$$

Propojíme prostorovou rozlehlost  $L$  a energii  $E$  vázaného stavu částice o hmotnosti  $m$  ... *kriterium superkvantového režimu*

1. krok kinetická energie částice ve vázaném stavu (v potenciál. jámě)

$$mE_{\text{kin}} \approx (\Delta p)^2$$

energie kvant. fluktuací

2. krok odhad z relace neurčitosti

$$\Delta p \approx \frac{\hbar}{\Delta x} \approx \frac{\hbar}{L}$$

3. krok kinetická a celková energie stejného řádu

$$m \cdot E \cdot L^2 \approx \hbar^2$$

# Planckova konstanta jako hraniční hodnota

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar \quad \text{relace neurčitosti}$$

Propojíme prostorovou rozlehlost  $L$  a energii  $E$  vázaného stavu částice o hmotnosti  $m$  ... *kriterium superkvantového režimu*

1. krok kinetická energie částice ve vázaném stavu (v potenciál. jámě)

$$mE_{\text{kin}} \approx (\Delta p)^2$$

energie kvant. fluktuací

2. krok odhad z relace neurčitosti

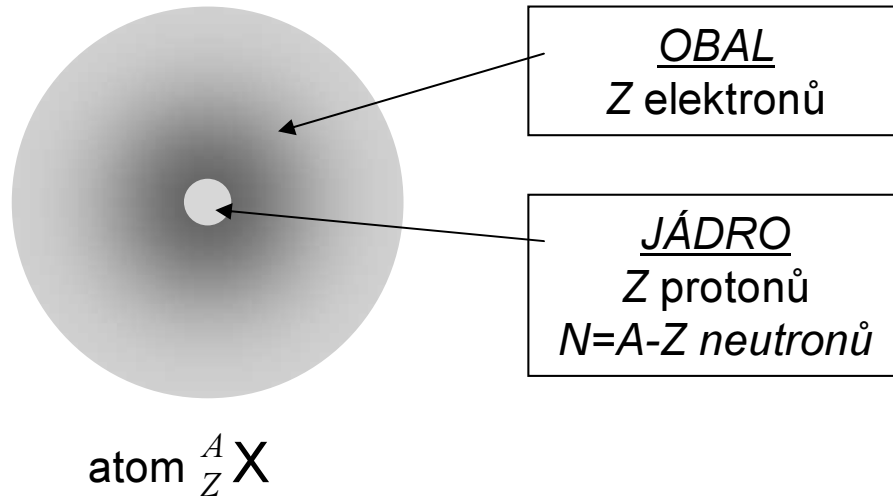
$$\Delta p \approx \frac{\hbar}{\Delta x} \approx \frac{\hbar}{L}$$

3. krok kinetická a celková energie stejného řádu

$$m \cdot E \cdot L^2 \approx \hbar^2$$

zkusíme pro atomy

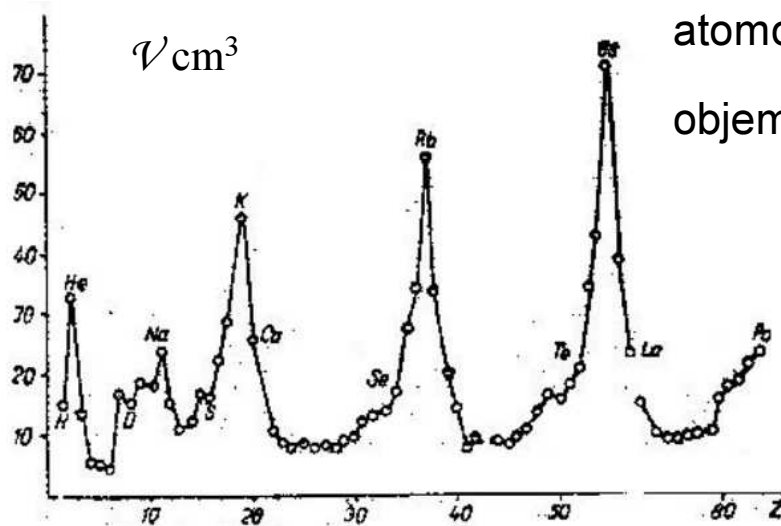
# Opakování o atomech



OBAL  
Z elektronů

JÁDRO  
Z protonů  
N=A-Z neutronů

náboj jádra  $Q = Z |e|$   
 hmotnost atomu  $M \sim A u$   
 poloměr jádra  $R = r_0 A^{1/3}$   
 $r_0 = 1,2 \times 10^{-15} \text{ m}$



atomový objem = rel. at. hmotnost  $\text{g} / 10^6 \times$  hustota  
 objem na atom = atomový objem / Avogadr. číslo

$$V = 10^{-6} M / \rho$$

$$r = \left( \frac{3}{4\pi} \times V / N_A \right)^{1/3}$$

... odhad z empirických dat

Obř. 4. Závislost atomového objemu na atomovém čísle

## Odhad ionizační energie atomu

$$m \cdot E \cdot L^2 \approx \hbar^2$$

použijeme našich jednotek nm, eV, fs

$$\frac{\hbar^2}{m_e} = \frac{0,66^2}{5,7} \approx 0,076$$

Poloměry atomů vycházejí v řádu 0,1 nm (1Å)

Energie atomů vycházejí v řádu eV



## Odhad ionizační energie atomu energie

$$m \cdot E \cdot L^2 \approx \hbar^2$$

použijeme našich jednotek nm, eV, fs

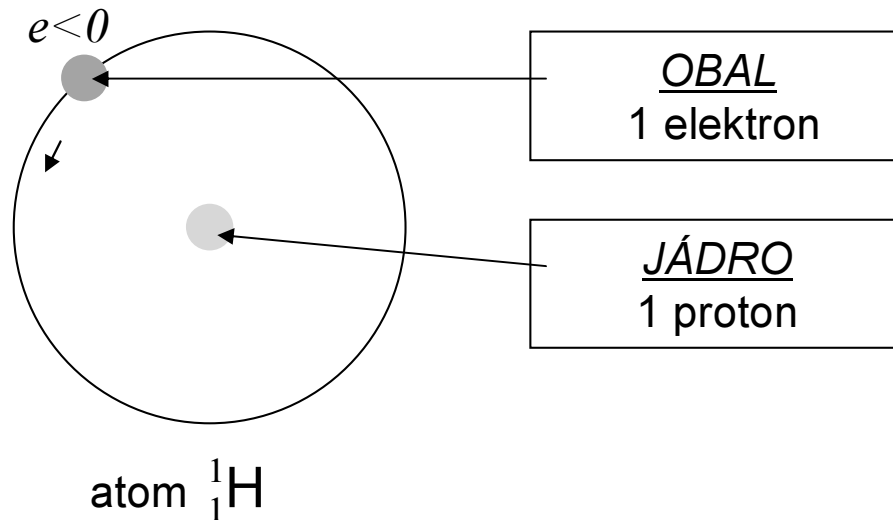
$$\frac{\hbar^2}{m_e} = \frac{0,66^2}{5,7} \approx 0.076$$

Poloměry atomů vycházejí v řádu 0,1 nm (1Å)

Energie atomů vycházejí v řádu eV

v tabulkách lze ověřit, že je to  
správný odhad

# Semiklasický popis atomu vodíku podle Bohra



|                |                                       |
|----------------|---------------------------------------|
| náboj jádra    | $Q =  e $                             |
| hmotnost atomu | $M \sim u \gg m_e$                    |
| poloměr jádra  | $R = r_0 \ll r$                       |
|                | $r_0 = 1,2 \times 10^{-15} \text{ m}$ |

- Elektron obíhá rychlostí  $v$  kolem nehybného jádra. Má hybnost  $p = m_e v$ , moment hybnosti  $m_e v r$ , odstředivá síla je  $m_e v^2 / r$  ... všechno klasické
- Přitahován je coulombickou silou

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r^2} \equiv \frac{e'^2}{r^2}$$

- Připojeno je kvantování, prostřednictvím *kvanta akce*, Planckovy konstanty  $\hbar$ .
- Veličina ke kvantování vhodná má rozměr akce. To je právě moment hybnosti.

# Bohrova teorie vodíku

- Dvě podmínky pro Bohrov poloměr a Hartreeho energii

odstř. síla = dostř. síla

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{e'^2}{r^2}$$

Klasická podmínka

kvantování momentu hybnosti

$$m_e r v = k \cdot \hbar, \quad k = 1, 2, \dots$$

Kvantová podmínka

- Výsledek

$$r_k = a_0 \cdot k^2, \quad E_k = -\frac{1}{2} E_0 \cdot k^{-2}$$

Bohrov poloměr  
0,052 nm

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e'^2},$$

$$E_0 = \frac{m_e e'^4}{\hbar^2}$$

Hartreeho energie  
27,2 eV

# Bohrova teorie vodíku

- Dvě podmínky pro Bohrov poloměr a Hartreeho energii

$$m v^2 = e'^2$$

Klasická podmínka

o tyto výpočty nejde, důležité je podívat se na výsledek který je exaktní

kvantování

- Výsledek

$$r_k = a_0 \cdot k^2, \quad E_k = -\frac{1}{2} E_0 \cdot k^{-2}$$

Bohrov poloměr  
0,052 nm

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e'^2},$$

$$E_0 = \frac{m_e e'^4}{\hbar^2}$$

Hartreeho energie  
27,2 eV

## *Přirozené jednotky*

Rozměrové úvahy a zavedení přirozených jednotek  
jsou založeny na víře (dobře již osvědčené), že  
rozměrová úvaha vede k výsledku, který se od  
přesného liší jen numerickým faktorem v řádu  
jednotek

# Přirozené jednotky ve fyzice

Přirozené soustavy jednotek závisejí na výběru fundamentálních konstant

| jednotky       | $G$ | $c$ | $\hbar$ | $e'^2$ | $m_e$ | $m_p$ | hodí se v                |
|----------------|-----|-----|---------|--------|-------|-------|--------------------------|
| Planckovy      | •   | •   | •       |        |       |       | kvantové gravitaci       |
| relativistické |     | •   | •       | •      |       |       | kvantové elektrodynamice |
| atomové        |     |     | •       | •      | •     |       | atomové fyzice           |

## Atomové jednotky

- Inspirace od *Bohra*(1913) Rozměrová úvaha → **relevantní veličiny**
- Dvě podmínky pro Bohrov poloměr a Hartreeho energii  
(rozměrové kombinace ... kinetická energie a Coulomb. potenciál. energie)

$$E_0 = \frac{\hbar^2}{m_e a_0^2}, \quad E_0 = \frac{e'^2}{a_0}$$

- Výsledek

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e'^2}, \quad E_0 = \frac{m_e e'^4}{\hbar^2}$$

v plné shodě s  
Bohrovou teorií

# Planckovy "přirozené" jednotky

Přirozené soustavy jednotek závisejí na výběru fundamentálních konstant

| jednotky       | $G$ | $c$ | $\hbar$ | $e'^2$ | $m_e$ | hodí se v                |
|----------------|-----|-----|---------|--------|-------|--------------------------|
| Planckovy      | •   | •   | •       | •      |       | kvantové gravitaci       |
| relativistické |     | •   | •       | •      |       | kvantové elektrodynamice |
| atomové        |     |     | •       | •      | •     | atomové fyzice           |

## Planckovy jednotky

- Sestavíme veličiny o rozměru **délka, hmotnost, čas**
- To jsou Planckovy jednotky, historicky první, jak je navrhl 1899, sotva svou konstantu zavedl, ještě bez dnešní interpretace
- Hodnoty Planckových jednotek jsou poněkud zarážející

$$\ell_P = (\hbar G / c^3)^{\frac{1}{2}} = 1.6 \times 10^{-35} \text{ m}$$

$$m_P = (\hbar c / G)^{\frac{1}{2}} = 2.2 \times 10^{-8} \text{ kg}$$

$$t_P = (\hbar G / c^5)^{\frac{1}{2}} = 5.4 \times 10^{-44} \text{ s}$$

## *Hlubší pohled na Planckovu volbu: ( $c\hbar G$ ) schéma*

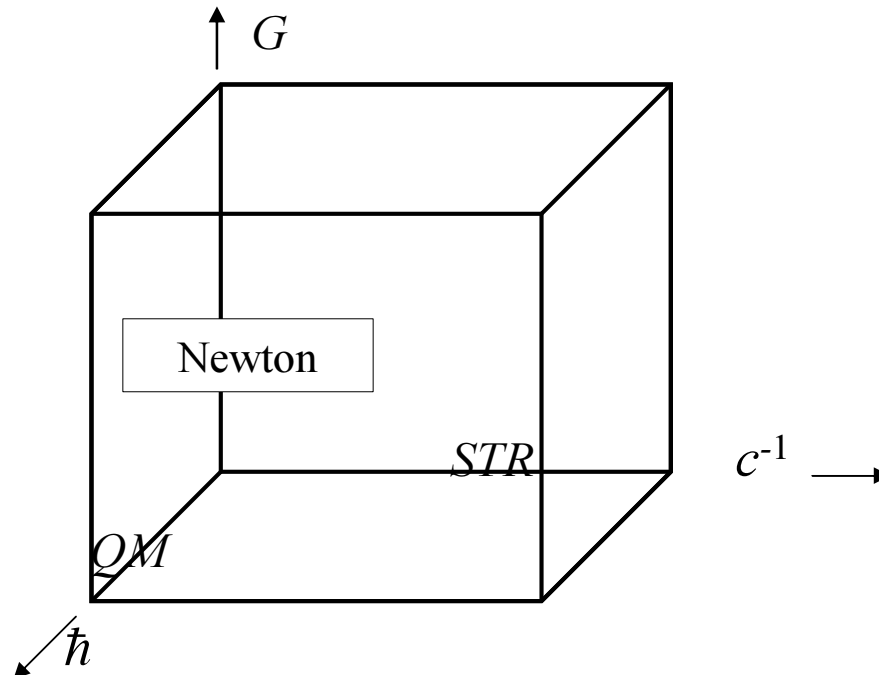
V atomové fyzice jsou jádra neměnná tělíska (téměř).

**Působí dvě universální interakce: gravitační a elektromagnetická**

Podmínky jejich působení lze znázornit v ( $c\hbar G$ ) schématu, které má Newtonův svět v počátku, tři hlavní teorie na osách.

Příklad: STR je důležitá, jestliže typická rychlost  $v \approx c$ ,  $v/c \approx 1$ , atd.

U atomové fyziky je gravitace slabá (Newtonova), jedná o kvasirelativistickou limitu, zato **kvantové efekty jsou započteny plně**.





## Hlubší pohled na Planckovu volbu: ( $c\hbar G$ ) schéma

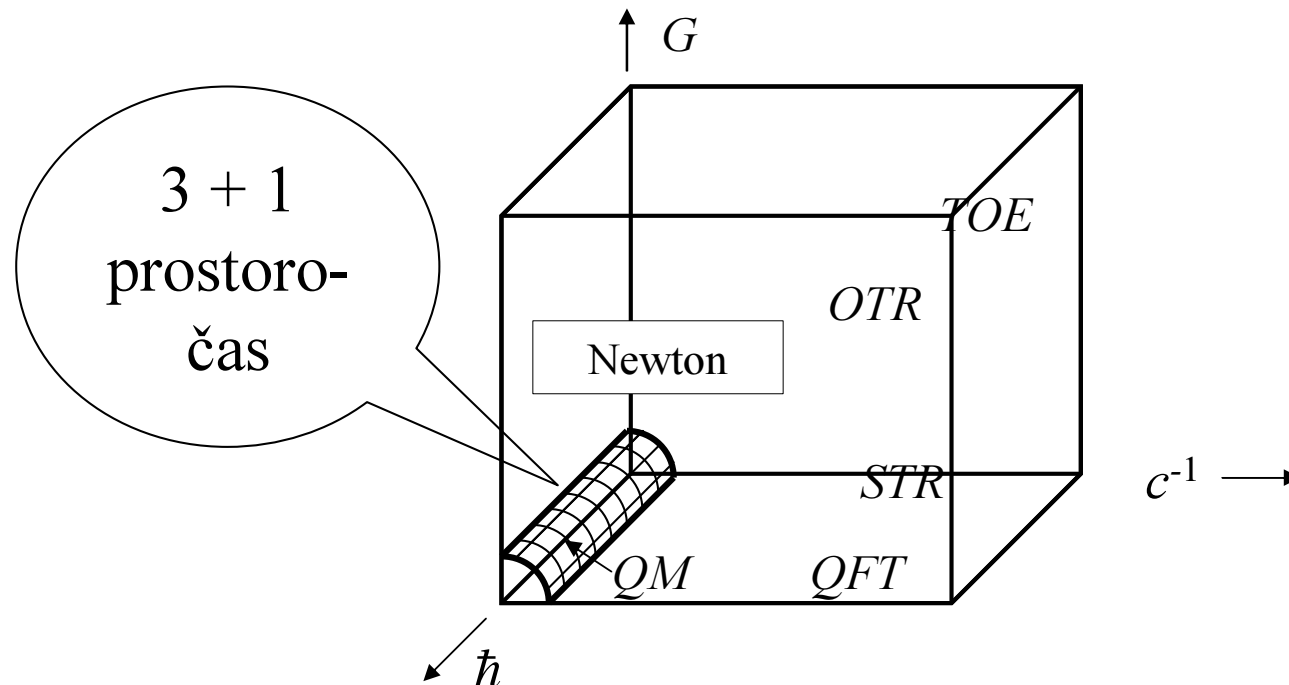
V atomové fyzice jsou jádra neměnná tělíska (téměř).

**Působí dvě universální interakce: gravitační a elektromagnetická**

Podmínky jejich působení lze znázornit v ( $c\hbar G$ ) schématu, které má Newtonův svět v počátku, tři hlavní teorie na osách.

Příklad: STR je důležitá, jestliže typická rychlost  $v \approx c$ ,  $v/c \approx 1$ , atd.

U atomové fyziky je gravitace slabá (Newtonova), jedná o kvasirelativistickou limitu, zato **kvantové efekty jsou započteny plně**.

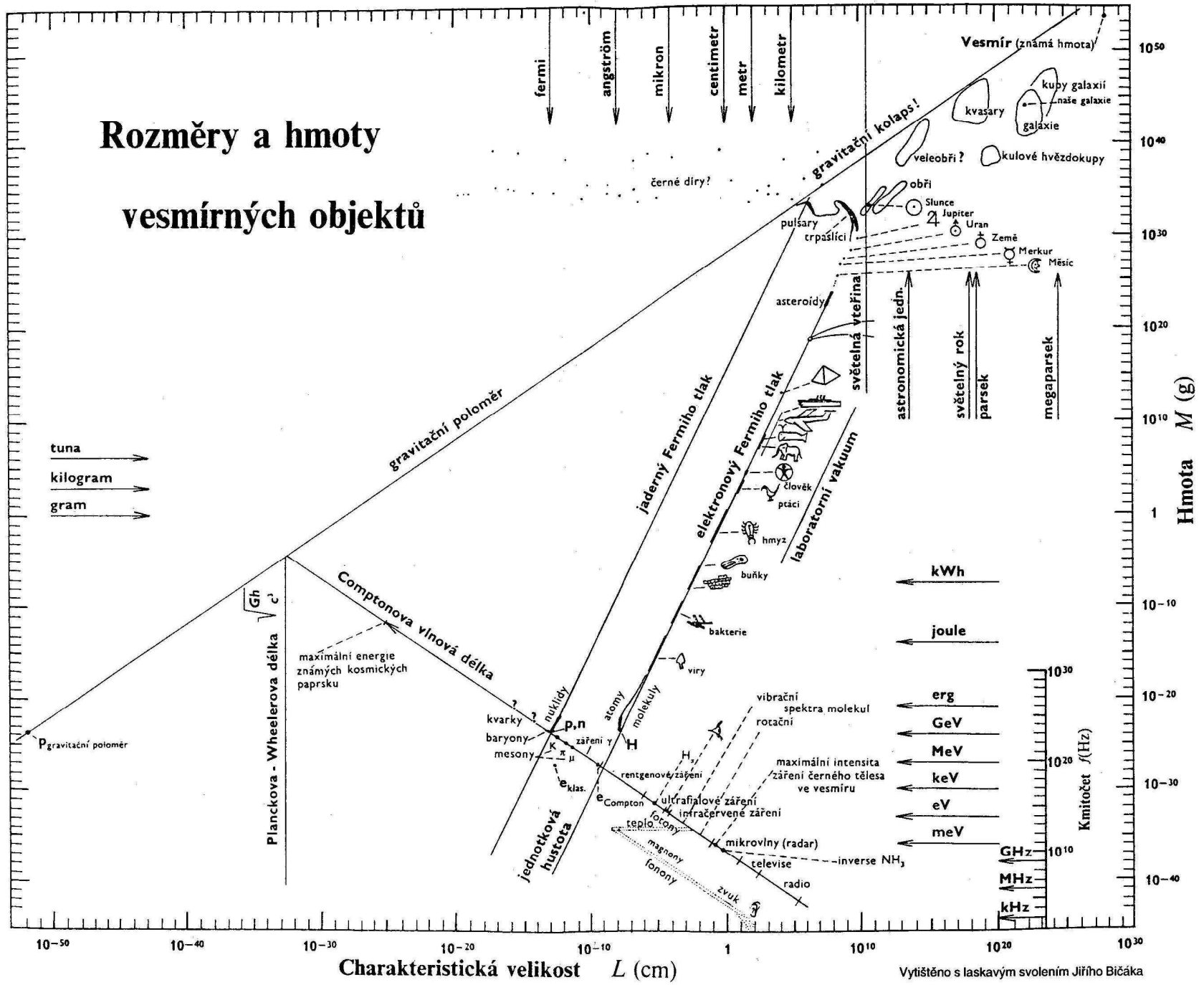


## *Bičákov diagram*

Zveřejněný již před mnoha lety ve  
Žlutém časopisu  
mírně zastaralý,  
ale stále inspirující.

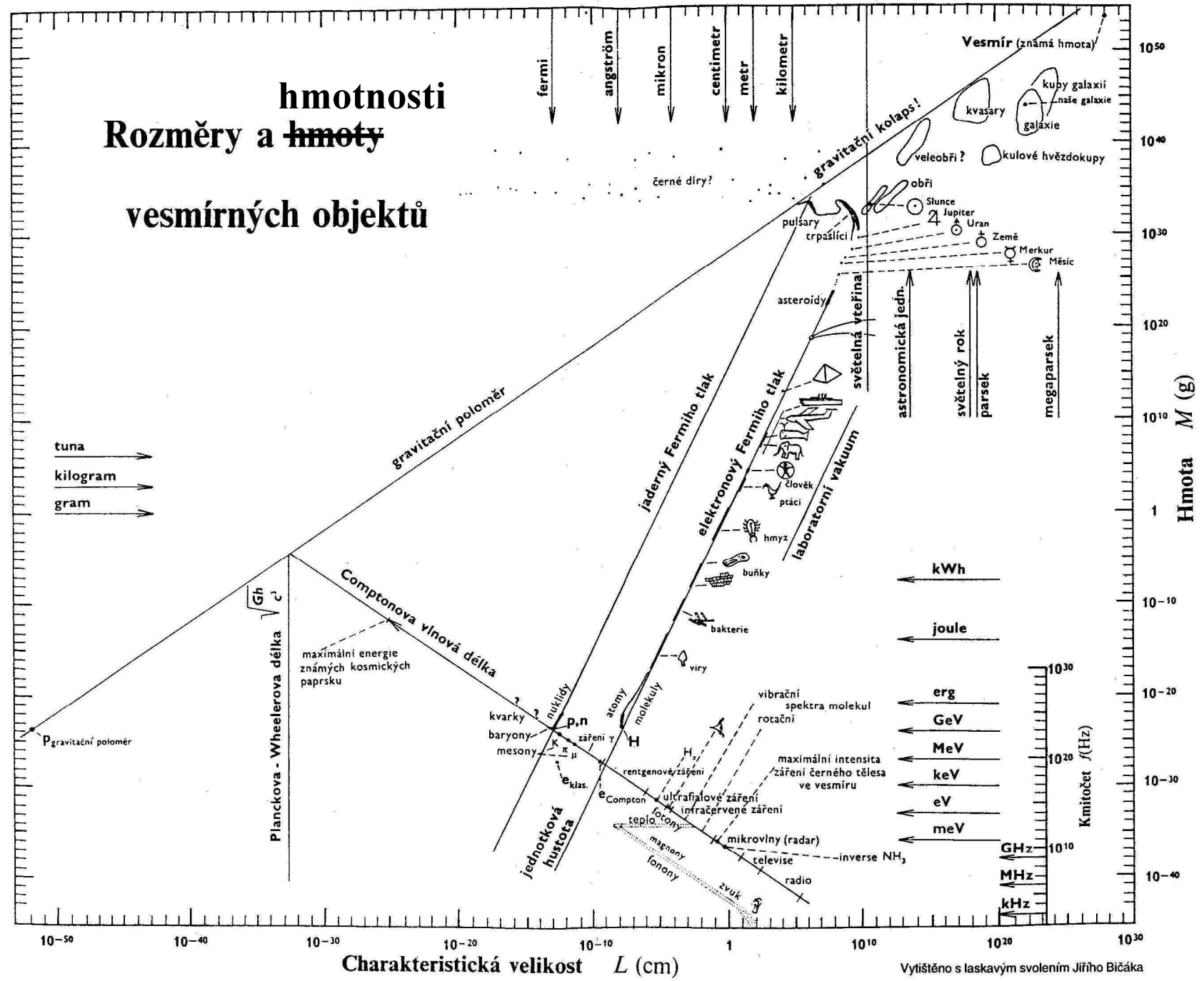
My se podíváme jen na několik  
detailů důležitých pro atomistiku

# Rozměry a hmoty vesmírných objektů



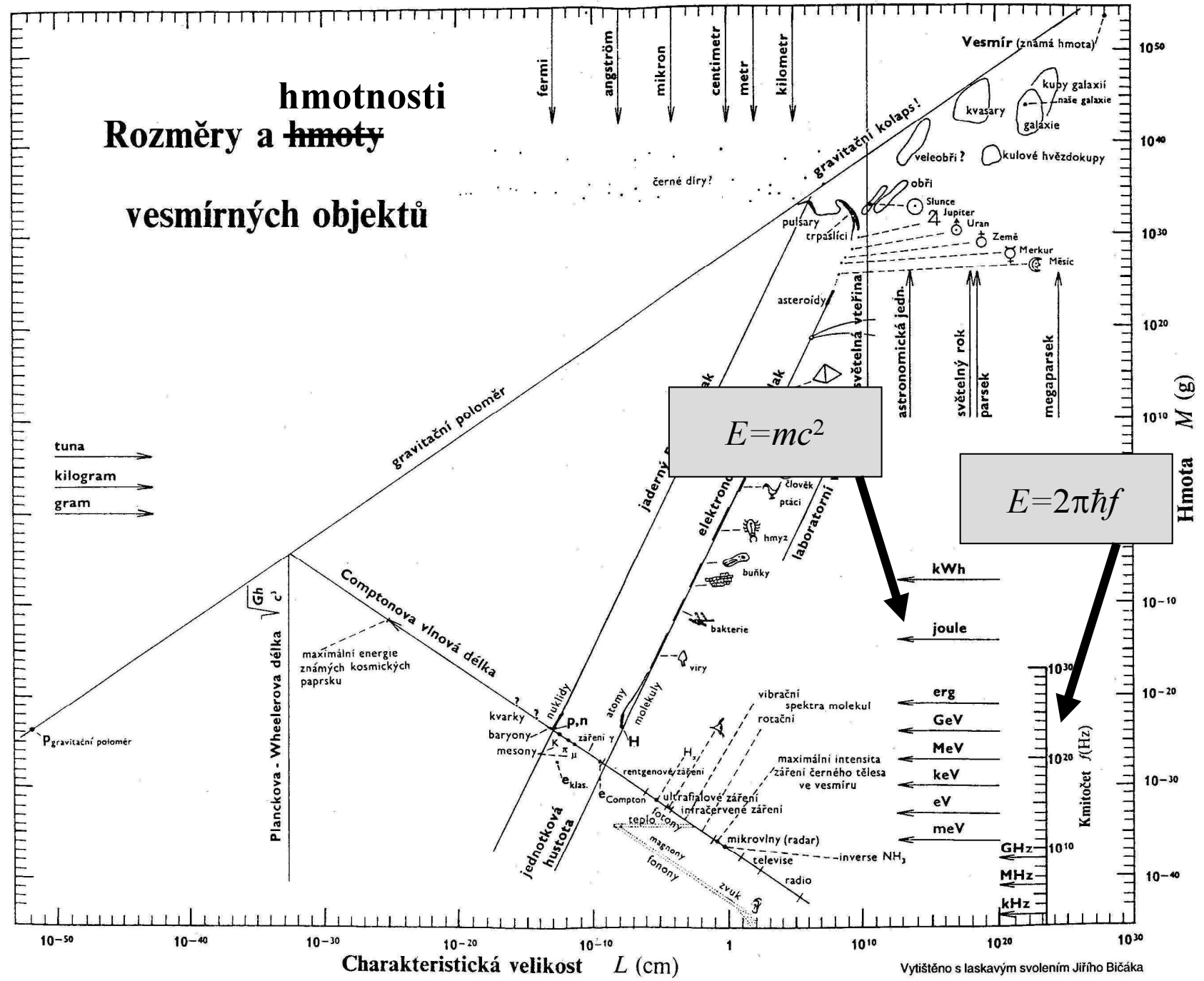
Vytištěno s laskavým svolením Jiřího Bičáka

# hmotnosti Rozměry a hmoty vesmírných objektů



Vytištěno s laskavým svolením Jiřího Bičáka

# hmotnosti Rozměry a hmoty vesmírných objektů



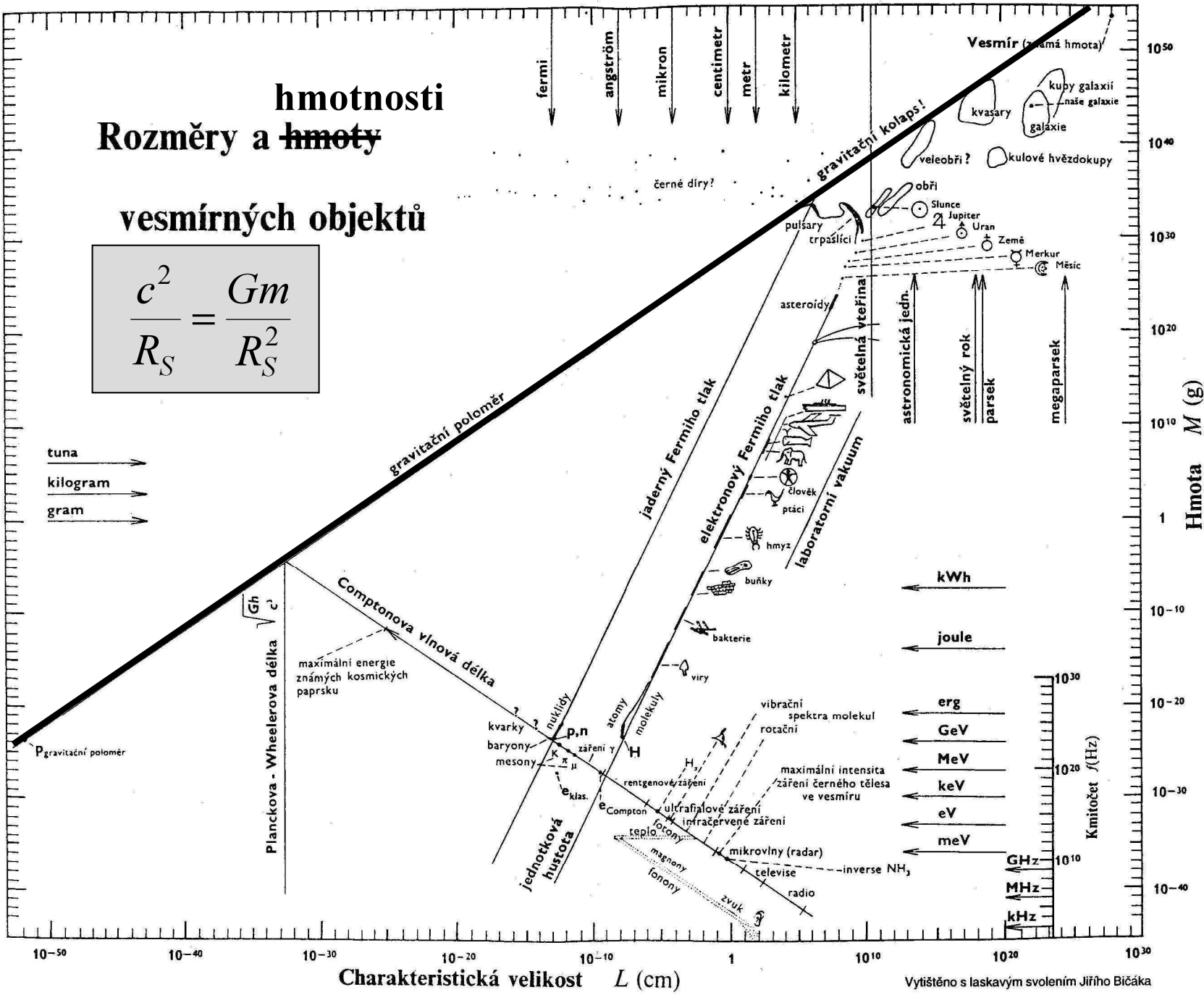
Vytlačeno s laskavým svolením Jiřího Bičáka

# hmotnosti Rozměry a hmoty

## vesmírných objektů

$$\frac{c^2}{R_S} = \frac{Gm}{R_S^2}$$

tuna  
kilogram  
gram



Vytištěno s laskavým svolením Jiřího Bičáka

## *Dvojlogaritmické měřítko*

$$Y = K \cdot X^\alpha$$

se zobrazí jako

$$\log Y = \log K + \alpha \cdot \log X$$







# hmotnosti Rozměry a hmoty

## vesmírných objektů

$$\frac{c^2}{R_S} = \frac{Gm}{R_S^2}$$

tuna  
kilogram  
gram

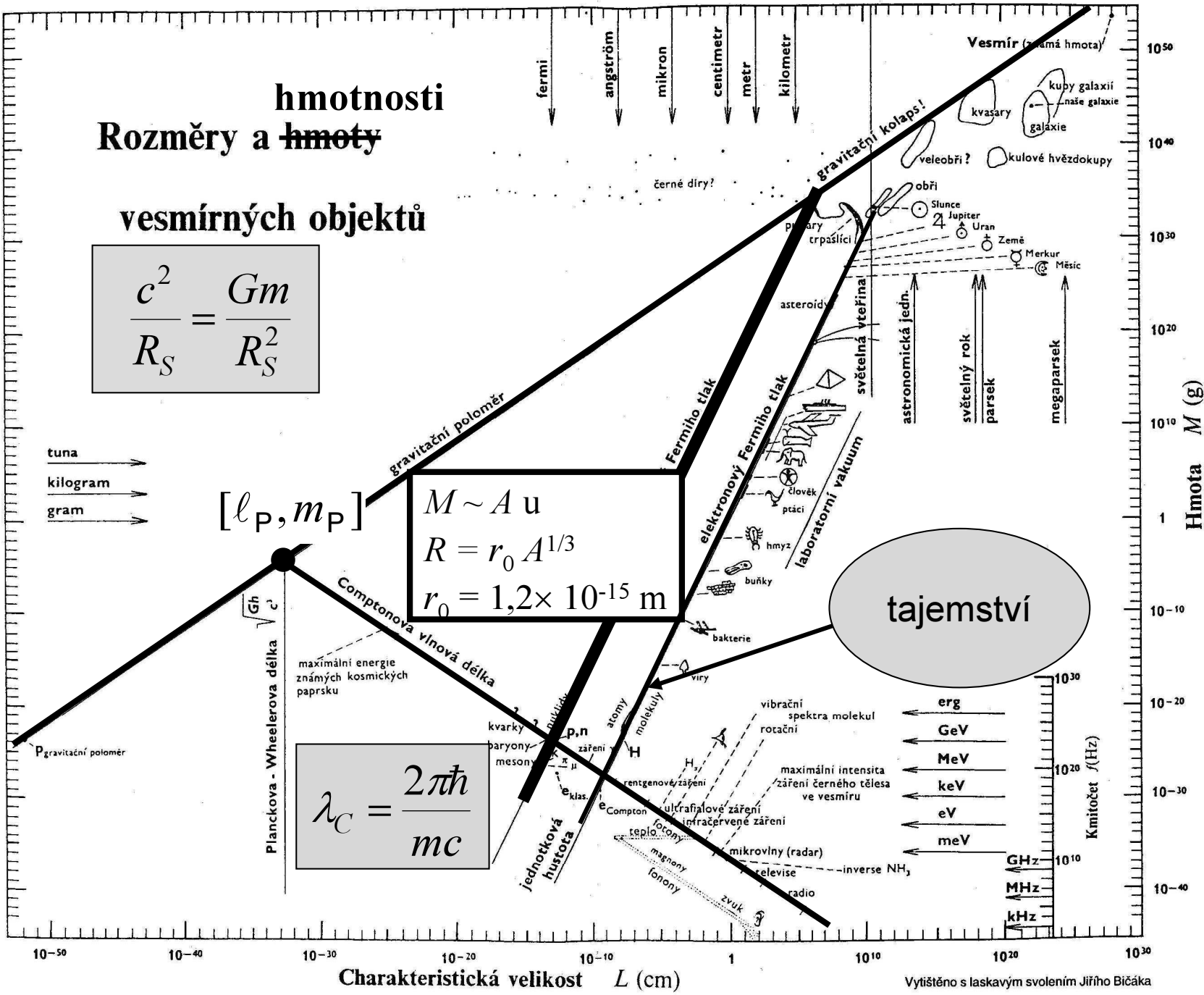
$[l_P, m_P]$

$$M \sim A u$$

$$R = r_0 A^{1/3}$$

$$r_0 = 1,2 \times 10^{-15} \text{ m}$$

$$\lambda_C = \frac{2\pi\hbar}{mc}$$



tajemství

Vytištěno s laskavým svolením Jiřího Bičáka

# hmotnosti Rozměry a hmoty

## vesmírných objektů

$$\frac{c^2}{R_S} = \frac{Gm}{R_S^2}$$

tuna  
kilogram  
gram

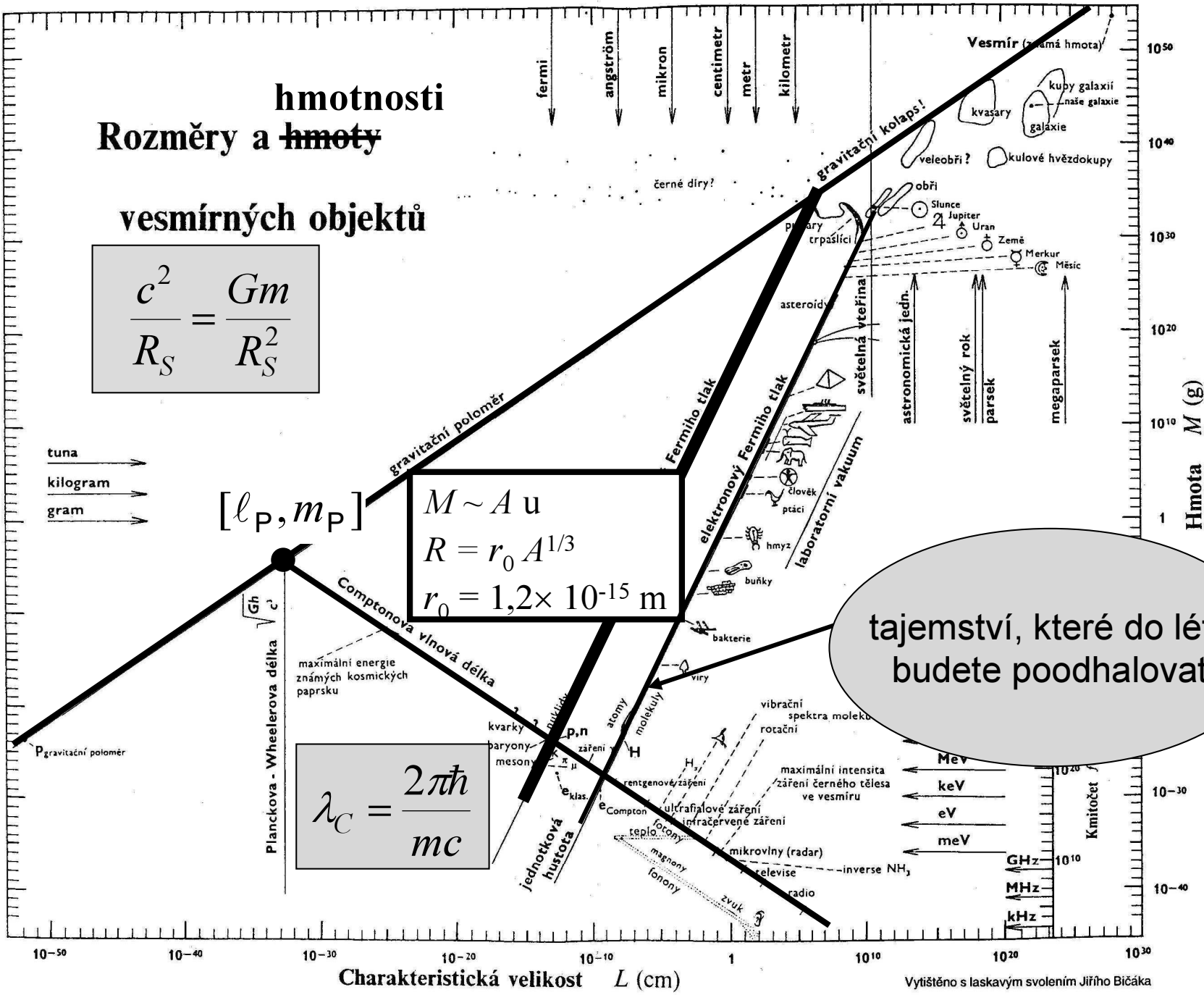
$[l_P, m_P]$

$$M \sim A u$$

$$R = r_0 A^{1/3}$$

$$r_0 = 1,2 \times 10^{-15} \text{ m}$$

$$\lambda_C = \frac{2\pi\hbar}{mc}$$



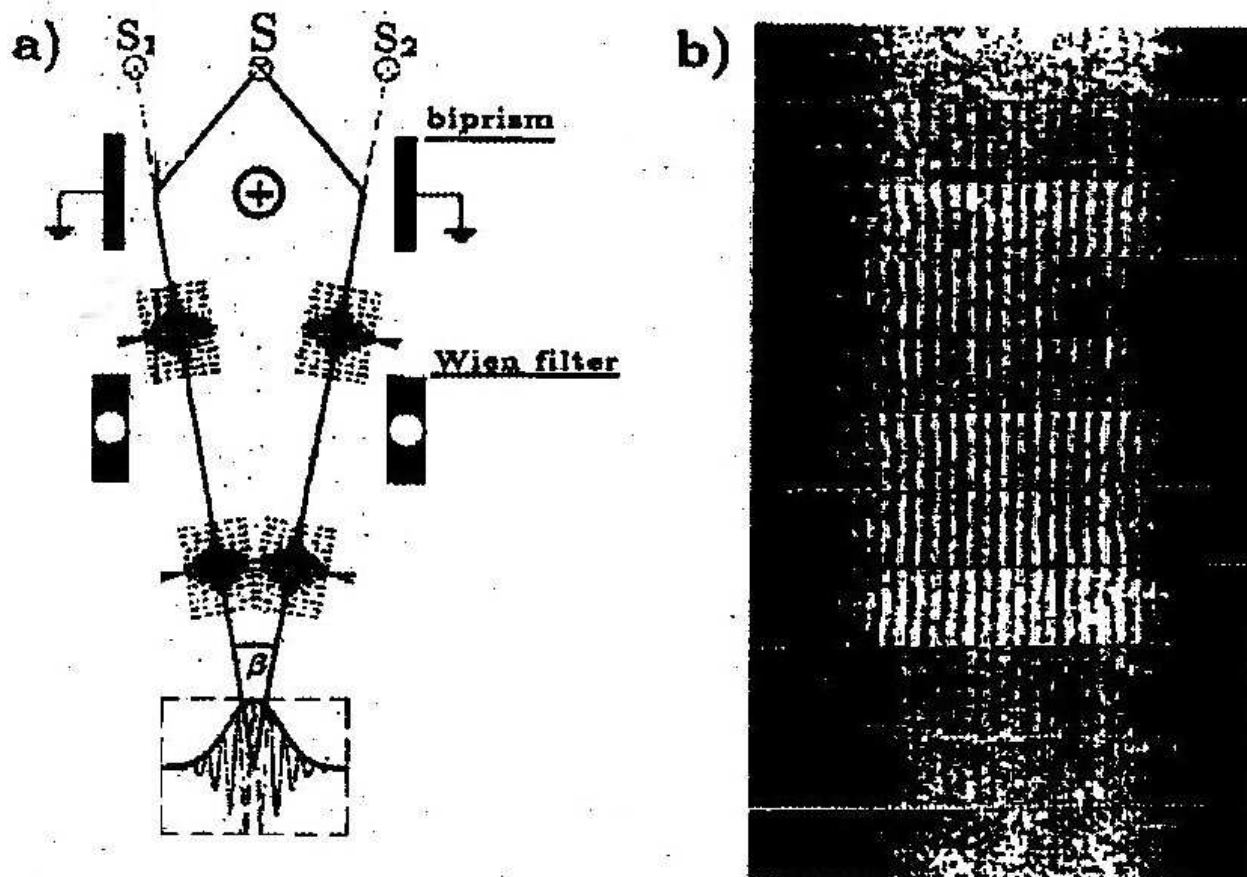
tajemství, které do léta  
budete podhalovat

Charakteristická velikost  $L$  (cm)

Vytlačeno s laskavým svolením Jiřího Bičáka

*The end*

# Interference elektronů po průchodu elektrickým biprismatem



zobrazen průchod rozdě-  
ného klubka biprismatem a  
interference na stínítku

**Wienův filtr je neaktivní**

→  
PŘEDNÁŠKA  
VIII.