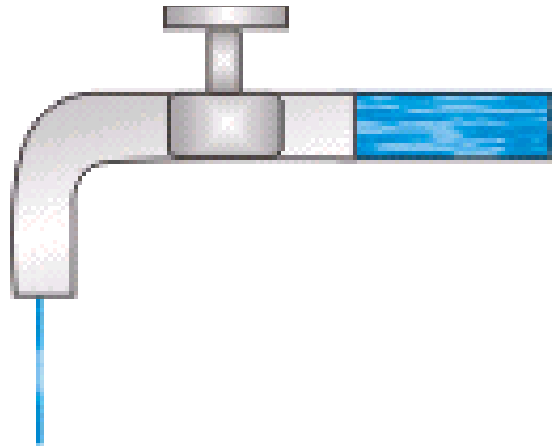


The background of the slide is a deep space image featuring a dense field of stars in various colors (blue, white, yellow) and a prominent spiral galaxy with a bright core and distinct arms, centered in the lower half of the frame.

Budoucnost mikroelektroniky „ve hvězdách“ ...

.... spintronika jednou z možných cest

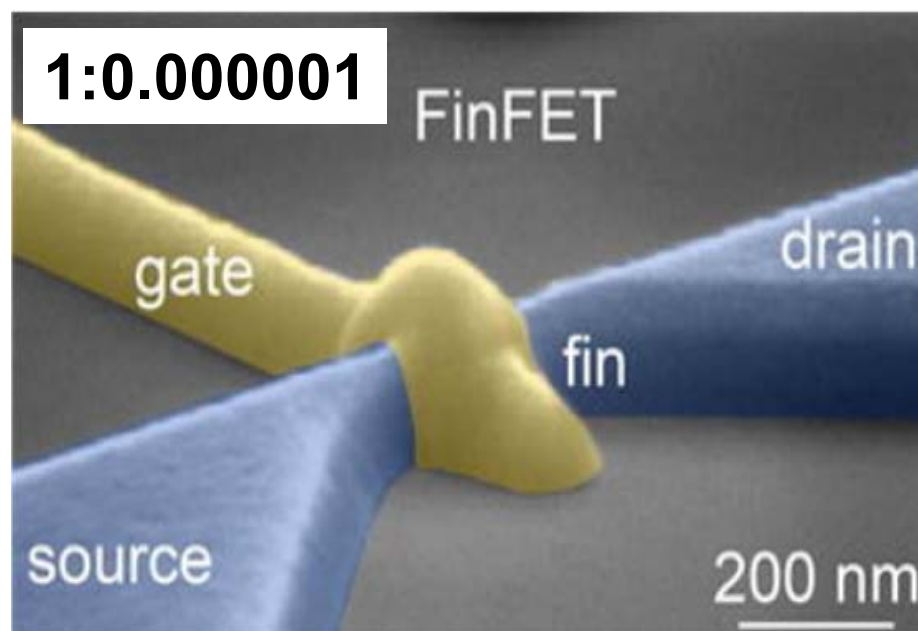
Transistor



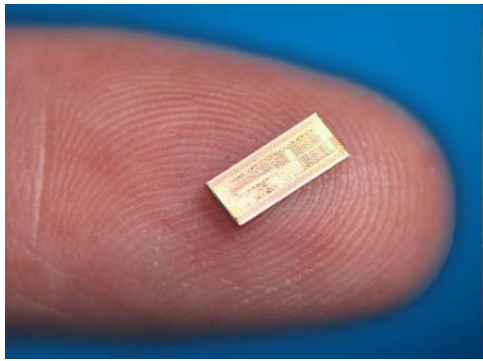
Transistor



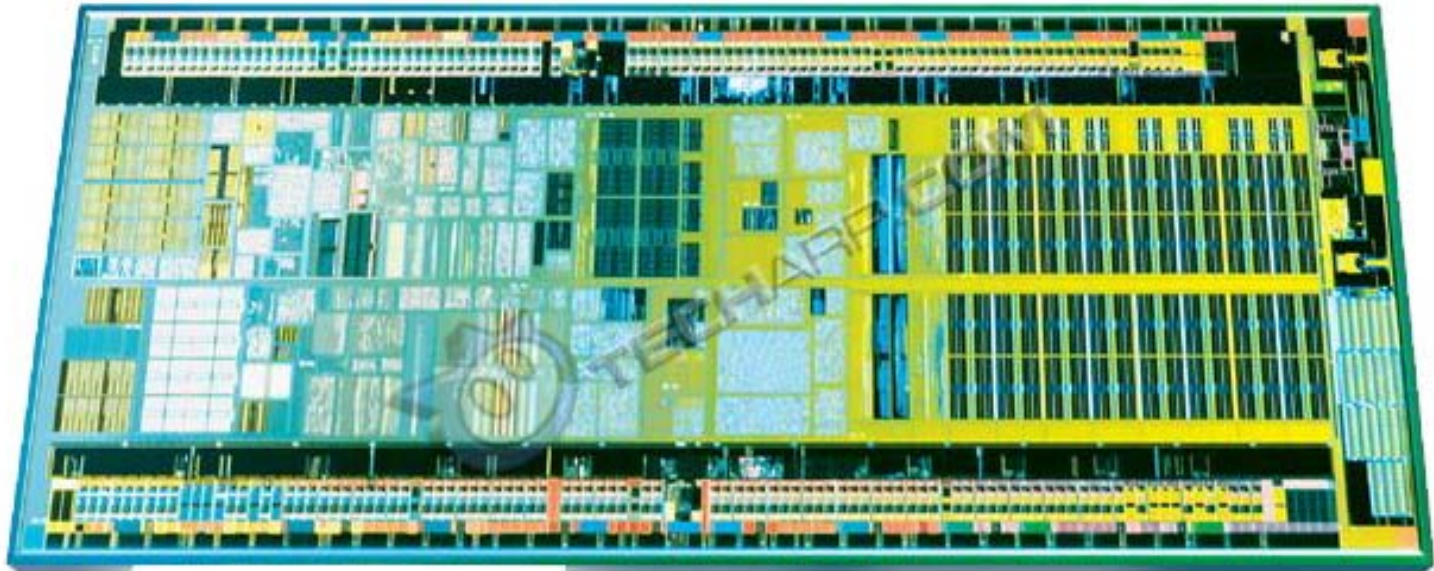
1. transistor z roku 1947



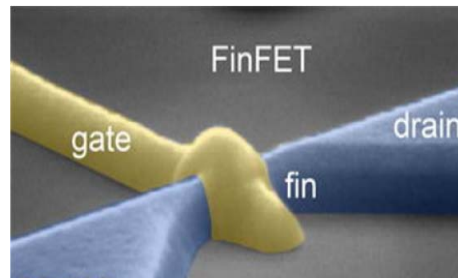
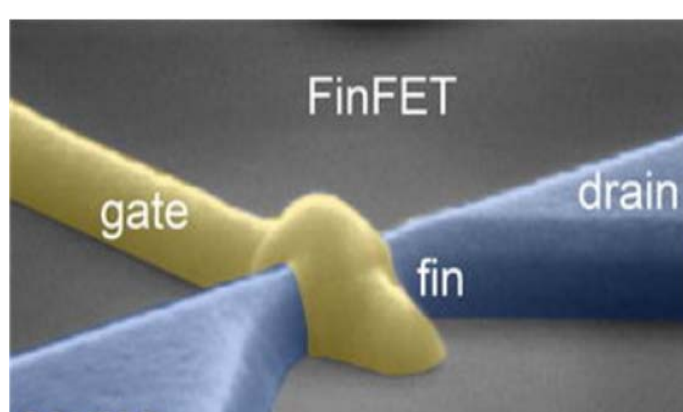
..dnes s velikostí hradla pod 20 nm a vzdáleností 2 nm od polovodivého kanálu (1 nm = 10^{-9} m)



Integrovaný obvod - čip

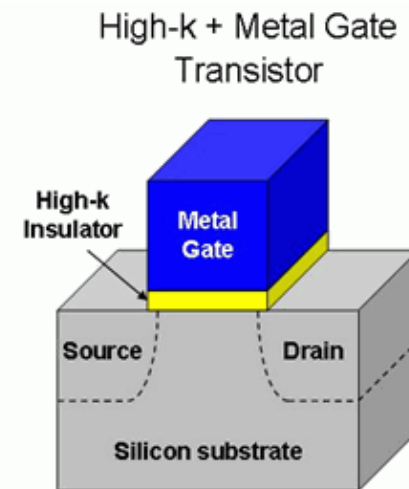
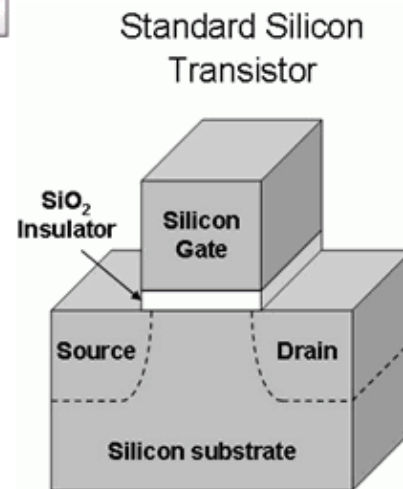
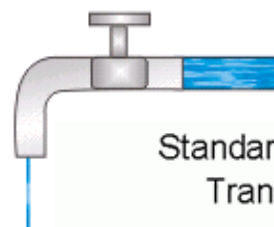
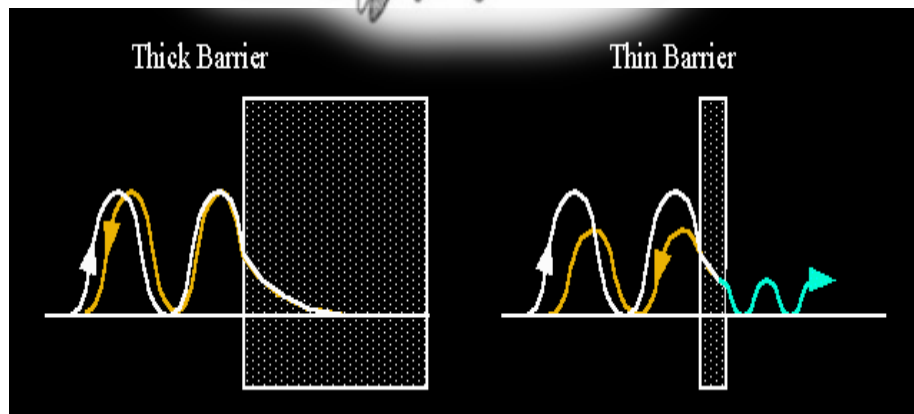
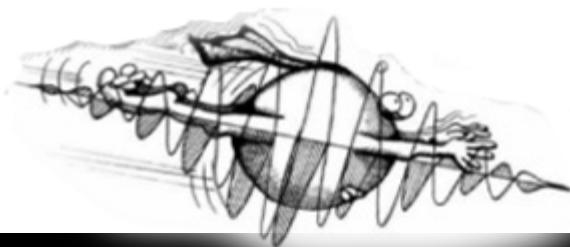


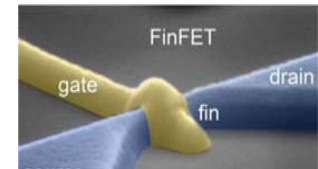
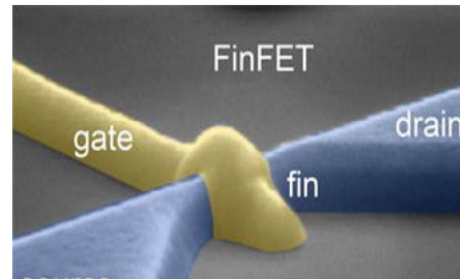
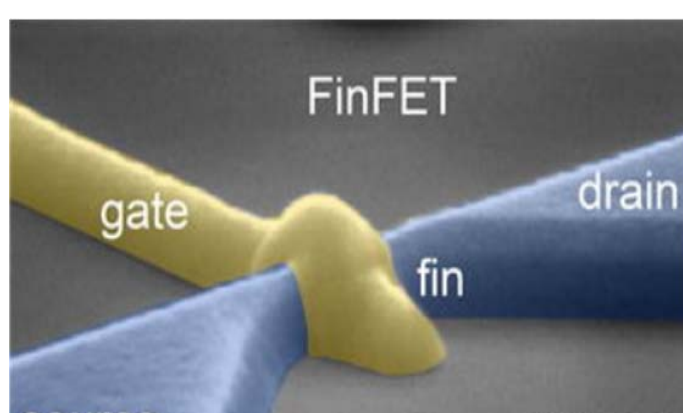
10-100 milionů transistorů na čipu
(Několik kilometrů drátů o tloušťce 10-100 nm)



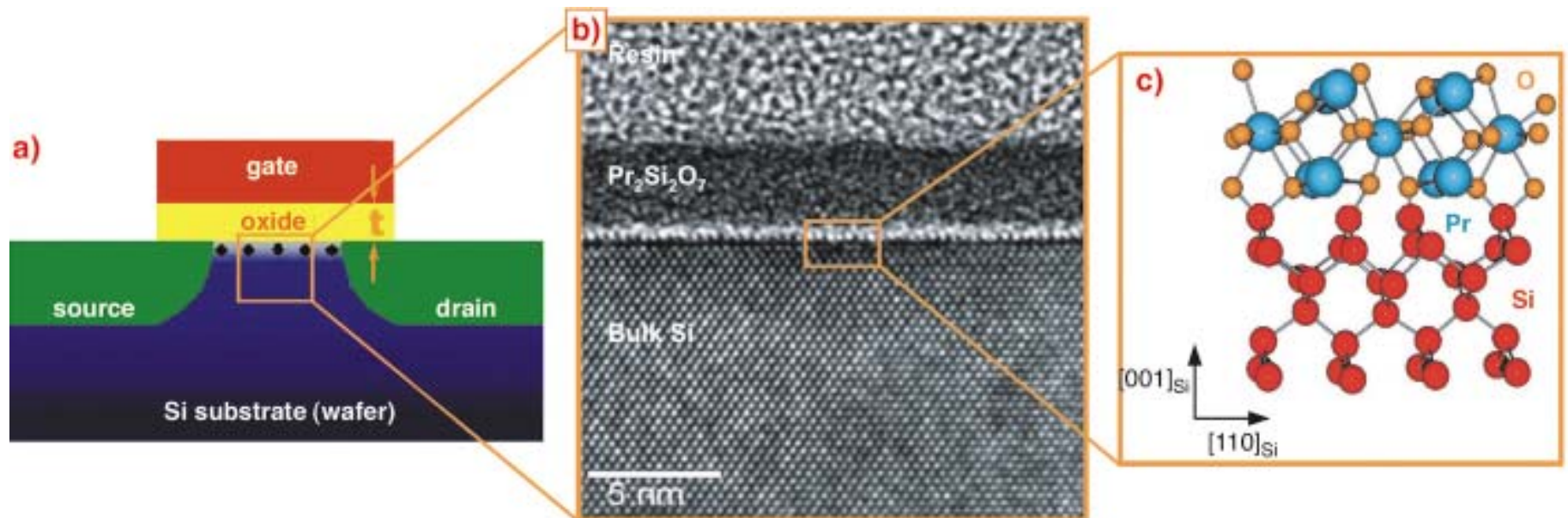
Na hranici klasické fyziky

Křemík už netěsní

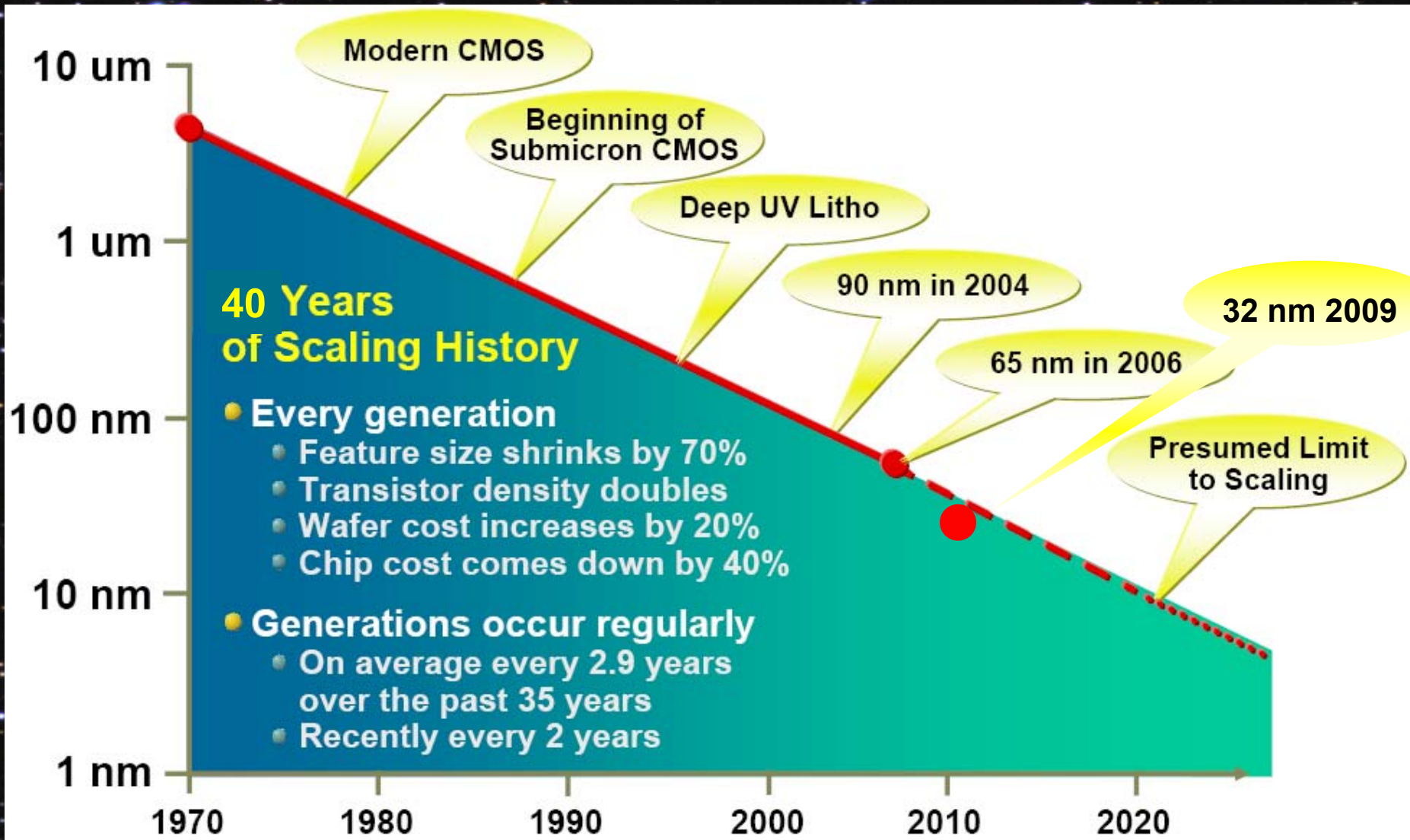




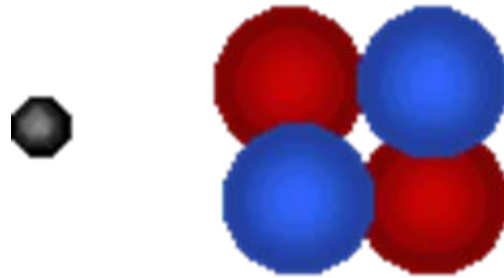
Fyzický koniec škálování u 1 nm, dál už jen jednotlivé atomy



Konec škálování na dohled – co potom je zatím „ve hvězdách“

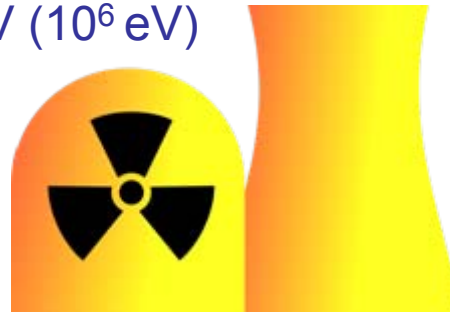


Atom



Valenční elektrony eV

Atomové jádro MeV (10^6 eV)



Elektron - íka

Elementární částice elektron:

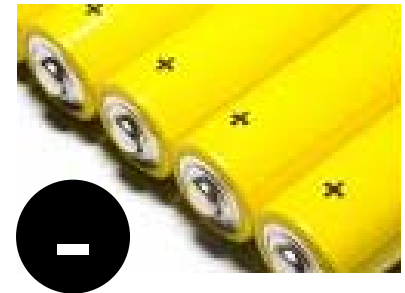
s nábojem (záporným)

$$Q = -1.60217646 \times 10^{-19} \text{ C}$$

s malou hmotností

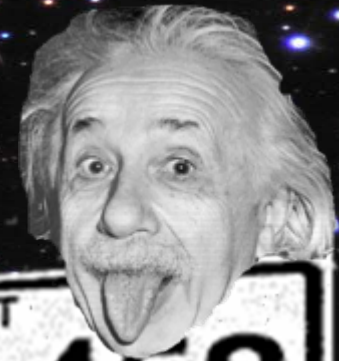
$$m = 9.10938188 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

Ovládán elektrickým polem



Co dál s elektronem?

Kvantová relativistická fyzika



SPEED LIMIT
299,792,458
m/s

$$E = \frac{p^2}{2m} \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t)$$
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial r^2} \psi(\vec{r}, t)$$



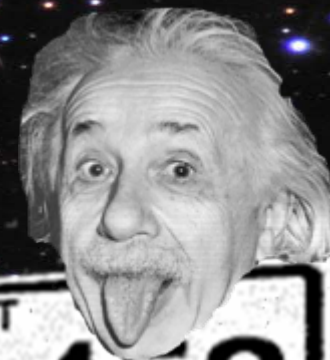
Kvantová relativistická fyzika

$$E = mc^2$$

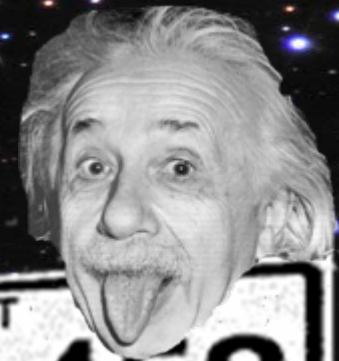
$$m = \gamma m_0$$



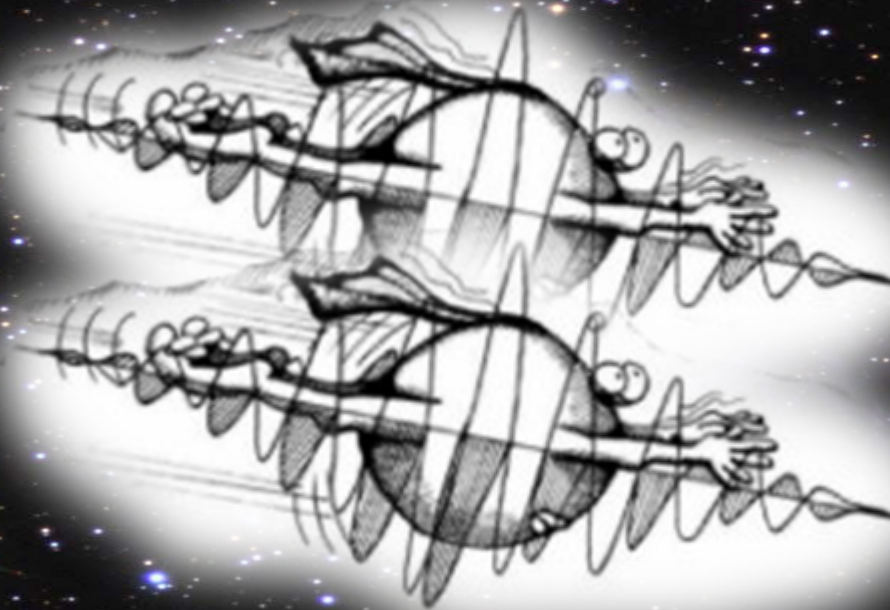
SPEED LIMIT
299,792,458
m/s



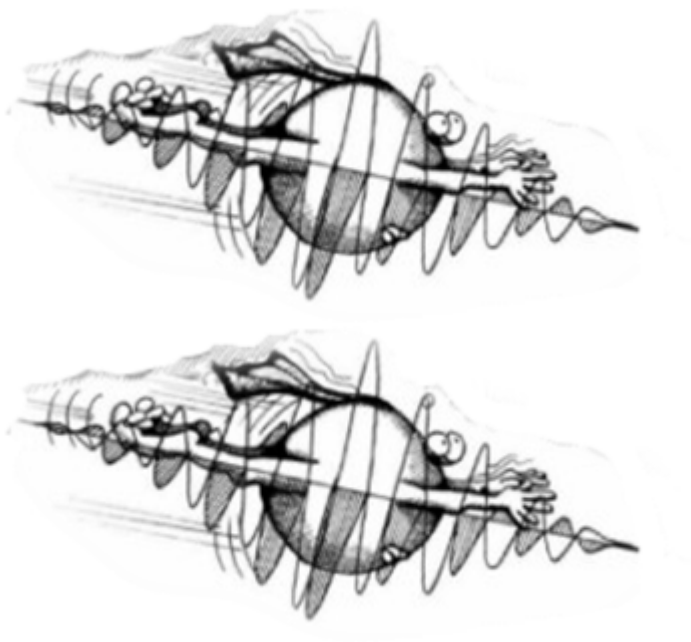
Kvantová relativistická fyzika



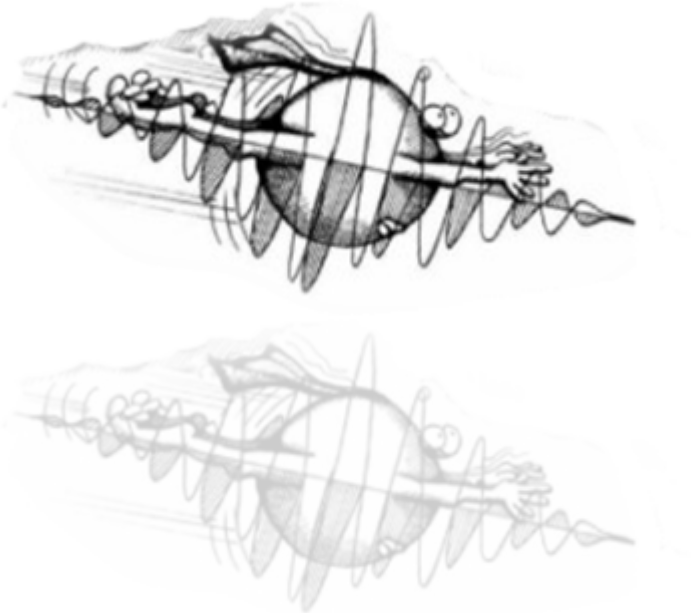
SPEED LIMIT
299,792,458
m/s



Spin: vnitřní stupeň volnosti elektronu

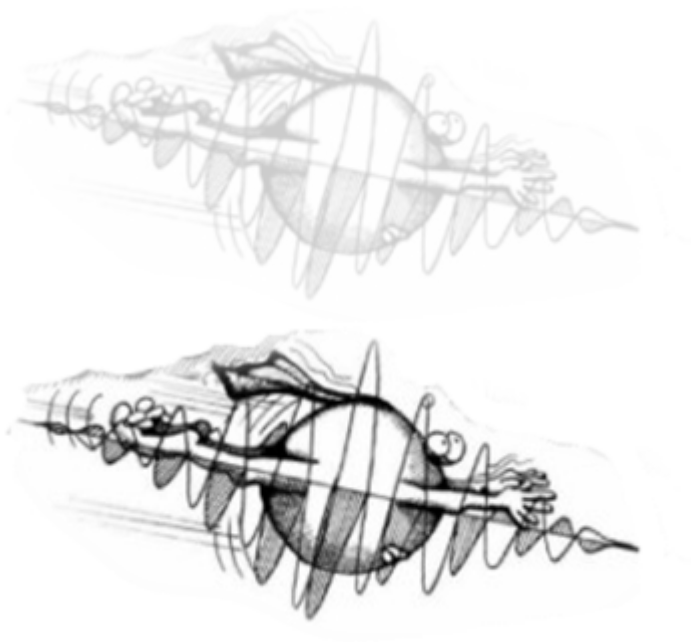


Spin: vnitřní stupeň volnosti elektronu



Spin-up ↑

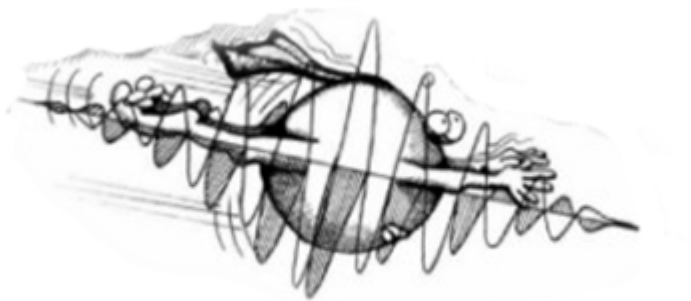
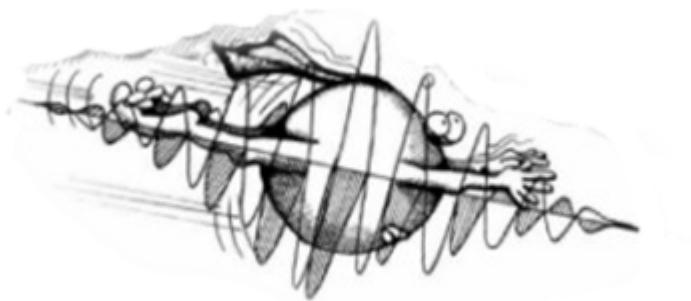
Spin: vnitřní stupeň volnosti elektronu



Spin-down



Spin: vnitřní stupeň volnosti elektronu



Kvantová fyzika:
libovlnná kombinace také možná

$$a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$$

Elektronika bez pohybu náboje jen se spinem

Klasické 2 bity a počítání

bud' $|00\rangle$ nebo $|11\rangle$ nebo $|10\rangle$ nebo $|01\rangle$

Kvantové 2 bity a počítání: $|1\rangle=|\uparrow\rangle$ a $|0\rangle=|\downarrow\rangle$

$a|00\rangle + b|11\rangle + c|10\rangle + d|01\rangle$

v páru kvantových bitů je možné uložit libovolnou kombinaci 4 stavů **najednou**

Pro n bitů je to 2^n stavů

2

4

10

1024

100

1267650600228229401496703205376

Elektronika s ultra-relativistickými částicemi se spinem

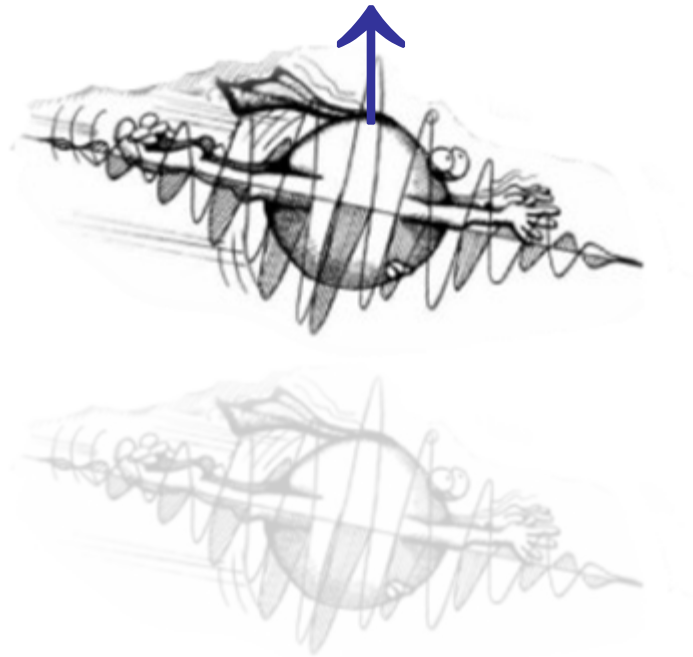
Ultrarychlé částice s klidovou hmotou blízkou 0 (neutrino)



Elektronika s ultra-relativistickými částicemi se spinem

Ultrarychlé částice s klidovou hmotou blízkou 0 (neutrino)

a navíc spin a pohyb se vzájemně ovlivňují



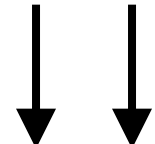
$$E = c\vec{p} \cdot \vec{s}$$

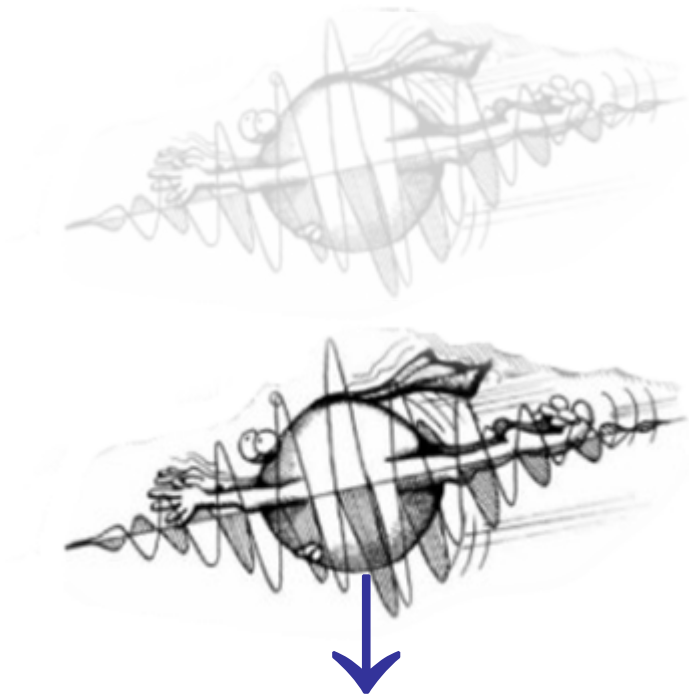
↑ ↑

Elektronika s ultra-relativistickými částicemi se spinem

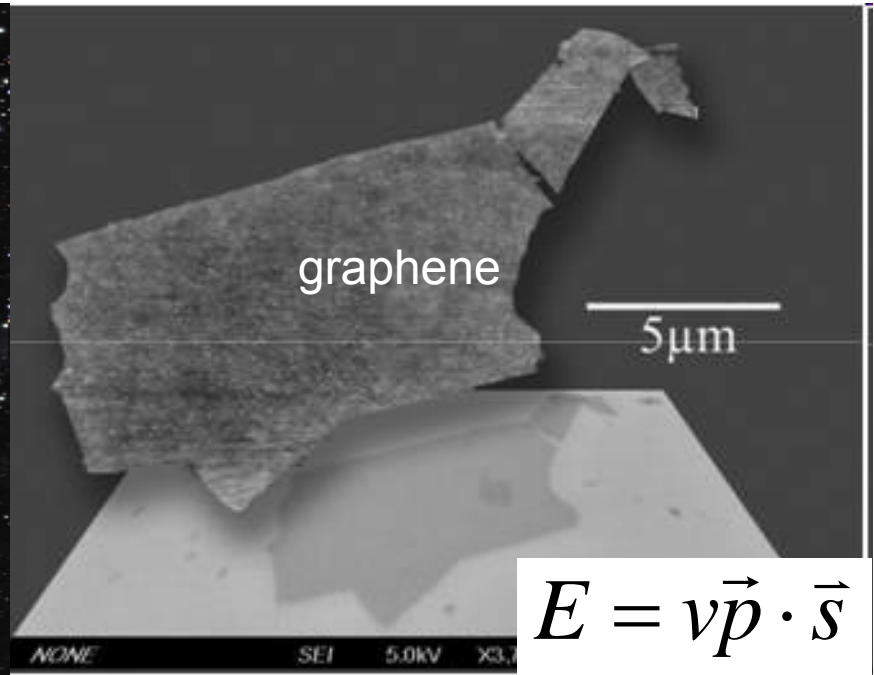
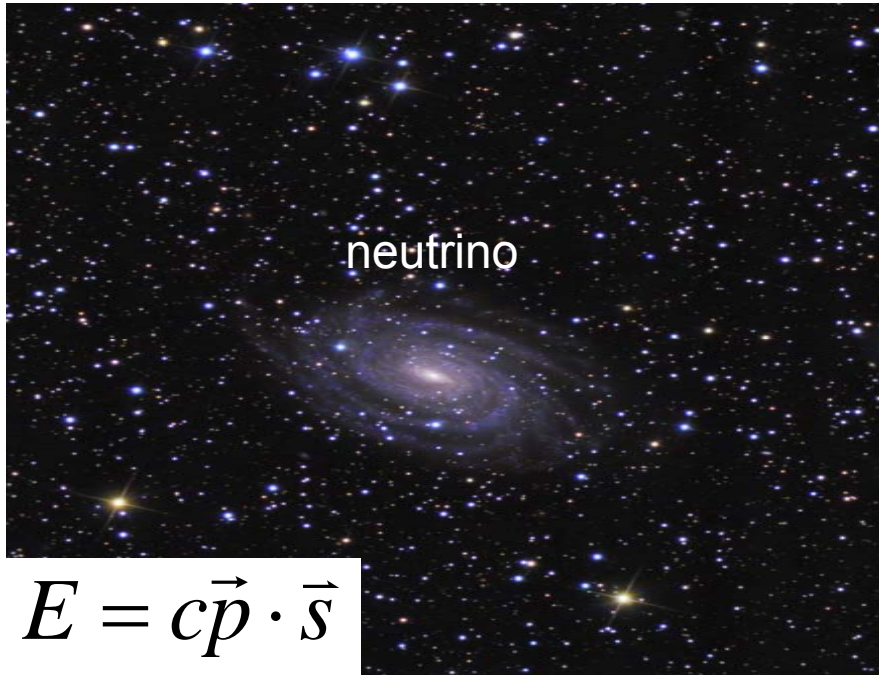
Ultrarychlé částice s klidovou hmotou blízkou 0 (neutrino)

a navíc spin a pohyb se vzájemně ovlivňují

$$E = c\vec{p} \cdot \vec{s}$$




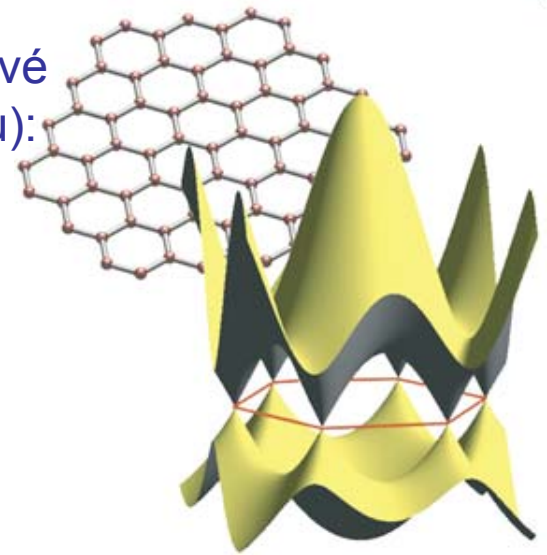
Ultra-relativistické elektrony v uhlíkové vložce



Elektron v jedné atomové vrstvě uhlíku (graphenu):

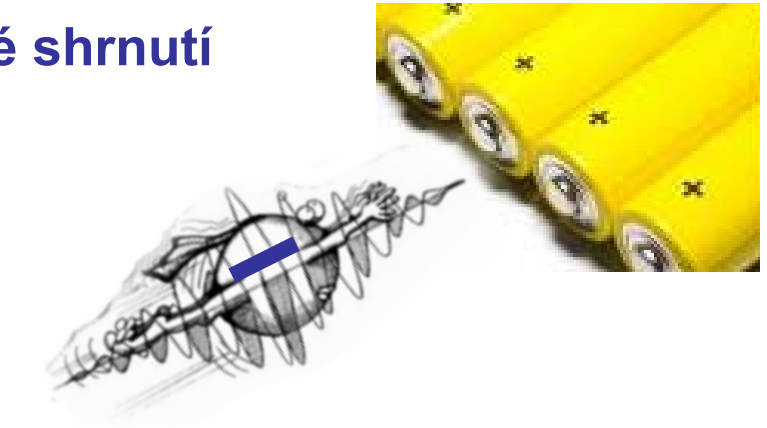
nulová efektivní hmota

rychlost $v = c/300$



Spintronika – malé shrnutí

Elektron nese elementární (záporný) náboj



Spintronika – malé shrnutí

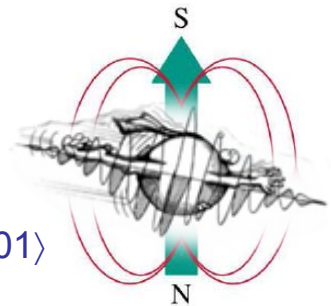


Elektron nese elementární (záporný) náboj



Elektron nese spin, se kterým se dá počítat i bez pohybu náboje

$$a|00\rangle + b|11\rangle + c|10\rangle + d|01\rangle$$



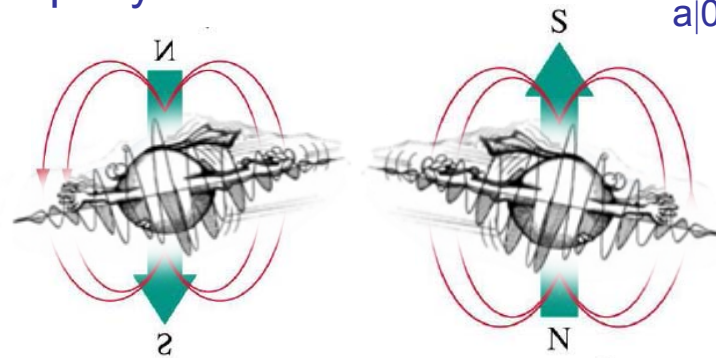
Spintronika – malé shrnutí



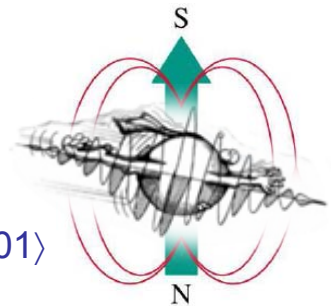
Elektron nese elementární (záporný) náboj



Elektron nese spin, se kterým se dá počítat i bez pohybu náboje a který může být s pohybem svázán



$$a|00\rangle + b|11\rangle + c|10\rangle + d|01\rangle$$



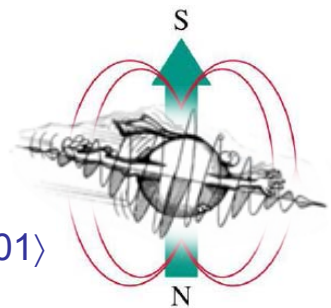
Spintronika – malé shrnutí



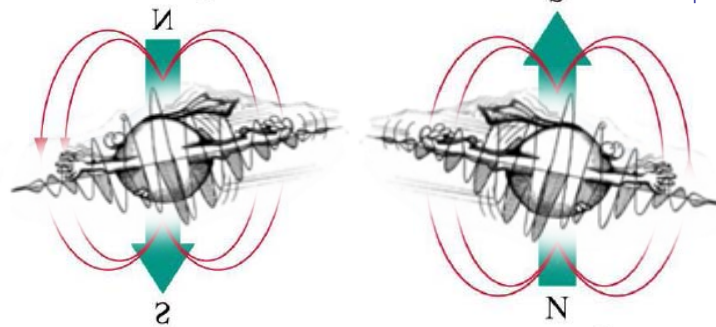
Elektron nese elementární (záporný) náboj



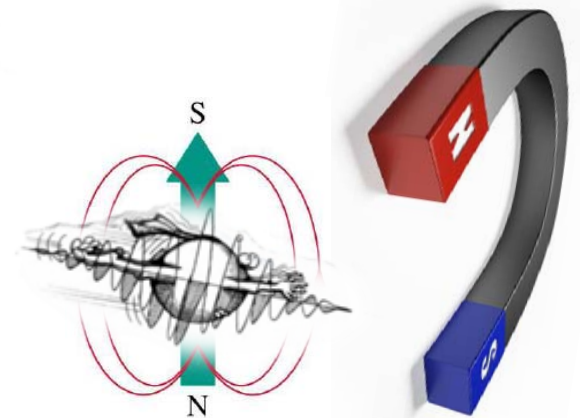
Elektron nese spin, se kterým se dá počítat i bez pohybu náboje a který může být s pohybem svázán



$$a|00\rangle + b|11\rangle + c|10\rangle + d|01\rangle$$



Spin je elementární magnetický moment



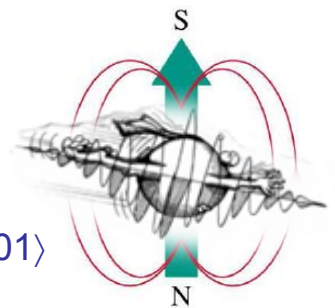
Spintronika – malé shrnutí



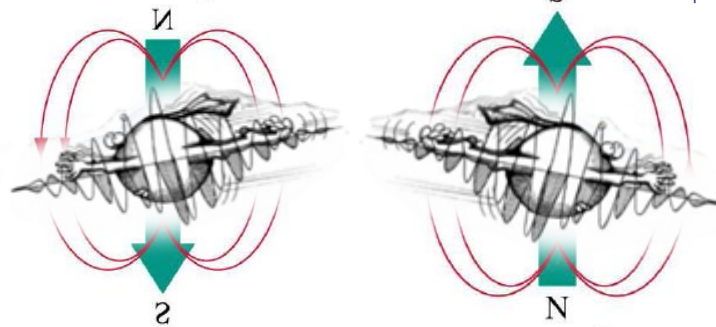
Elektron nese elementární (záporný) náboj



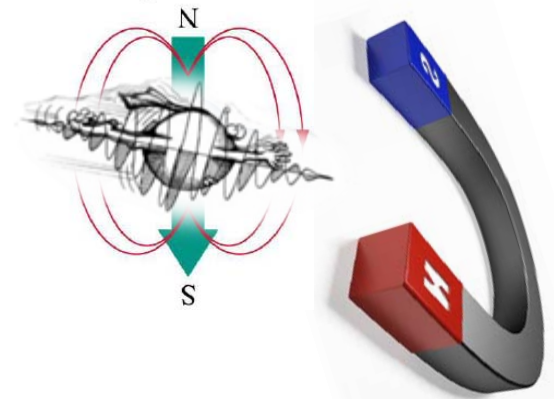
Elektron nese spin, se kterým se dá počítat i bez pohybu náboje a který může být s pohybem svázán



$$a|00\rangle + b|11\rangle + c|10\rangle + d|01\rangle$$

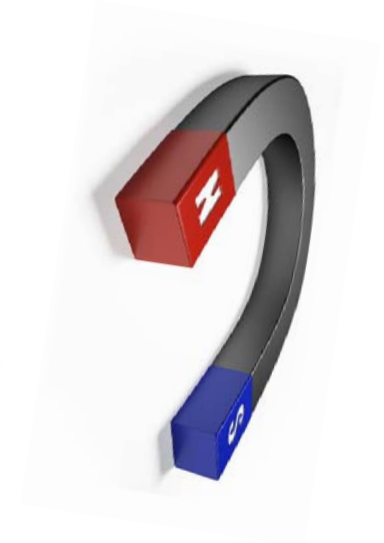
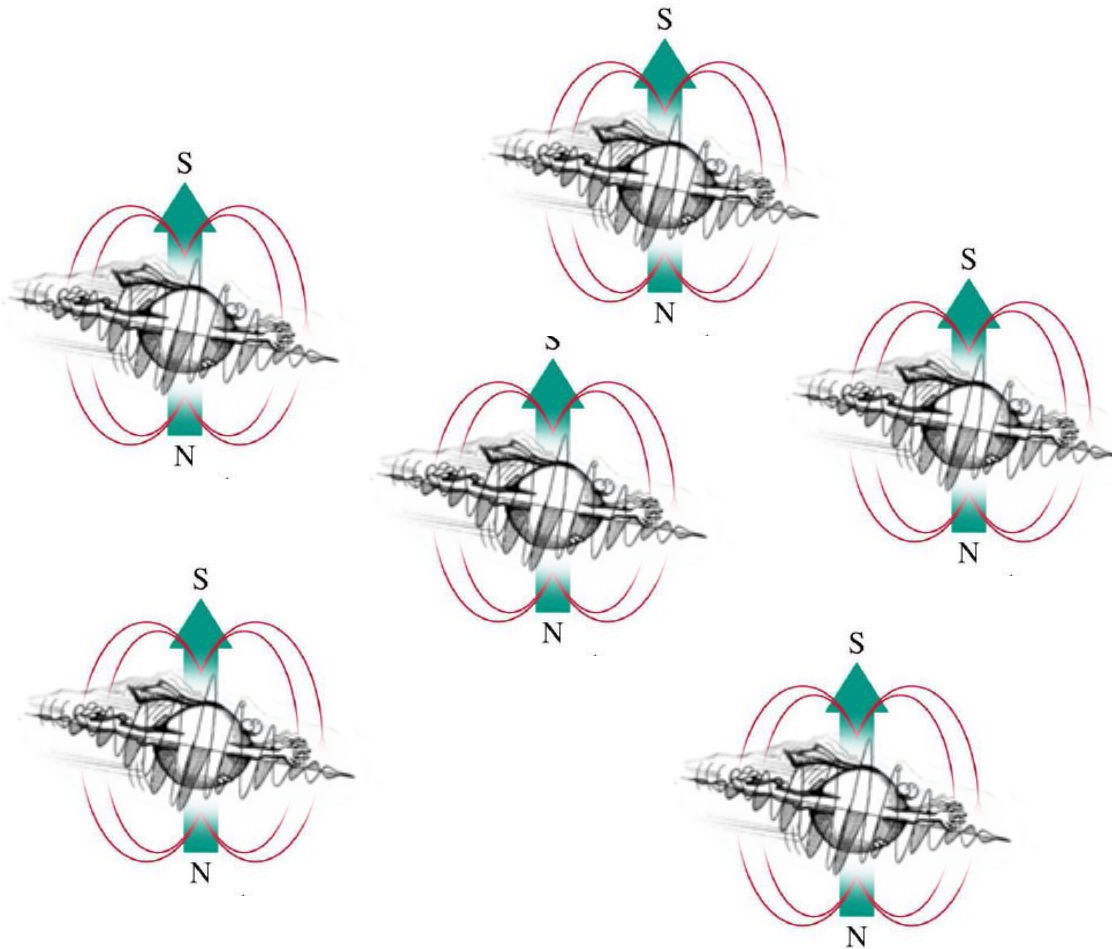


Spin je elementární magnetický moment



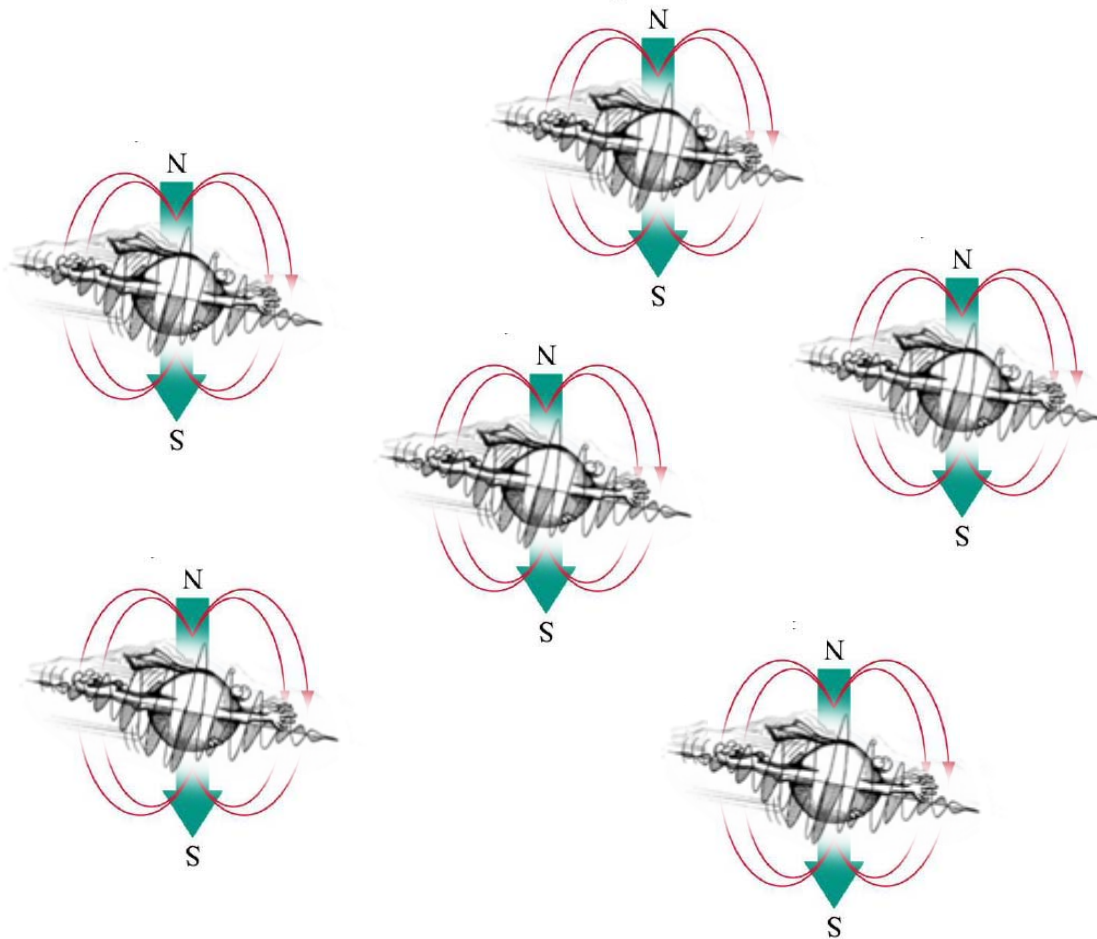
Dnes spintronické součástky využívají feromagnetické vodiče

Kolektivní chování spinů – snadné ovládání a velký signál



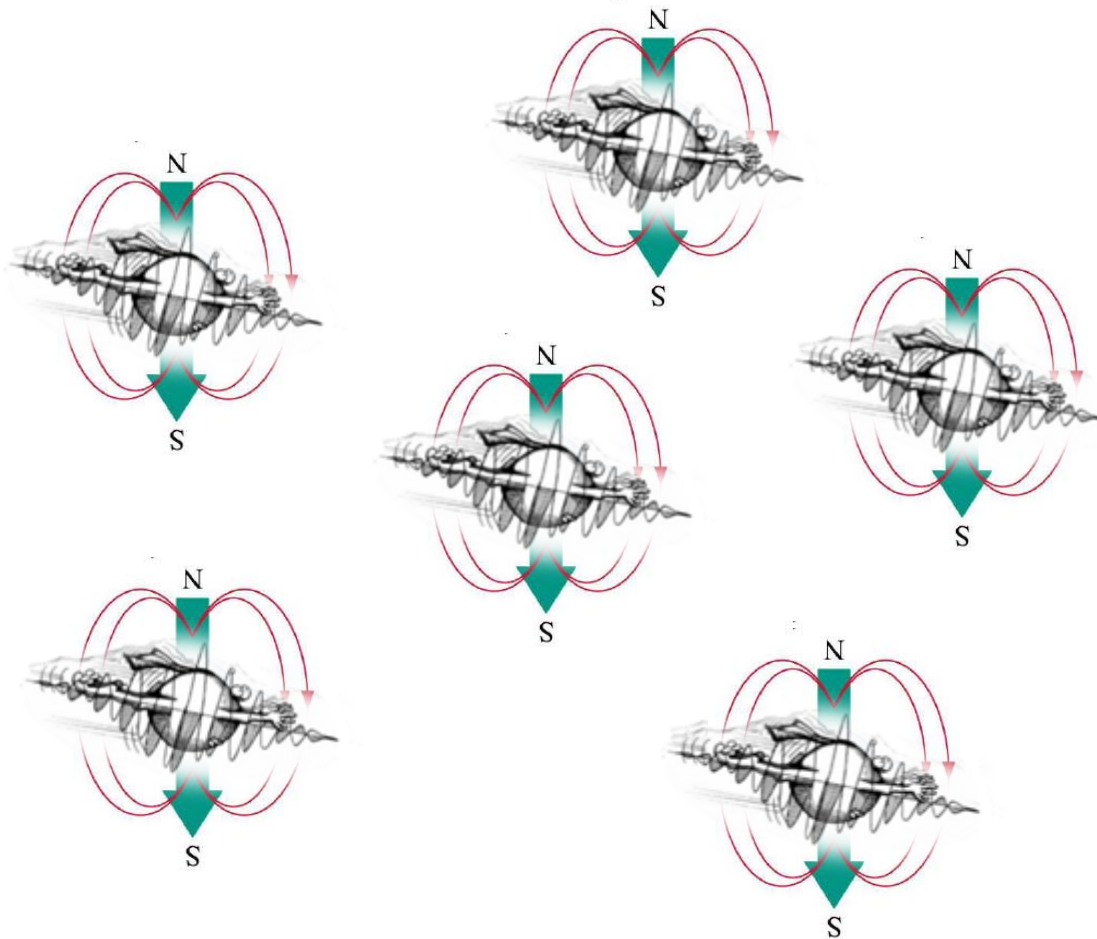
Dnes spintronické součástky využívají feromagnetické vodiče

Kolektivní chování spinů – snadné ovládání a velký signál

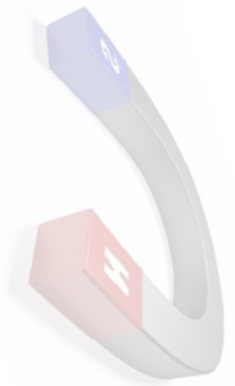


Dnes spintronické součástky využívají feromagnetické vodiče

Kolektivní chování spinů – snadné ovládání a velký signál

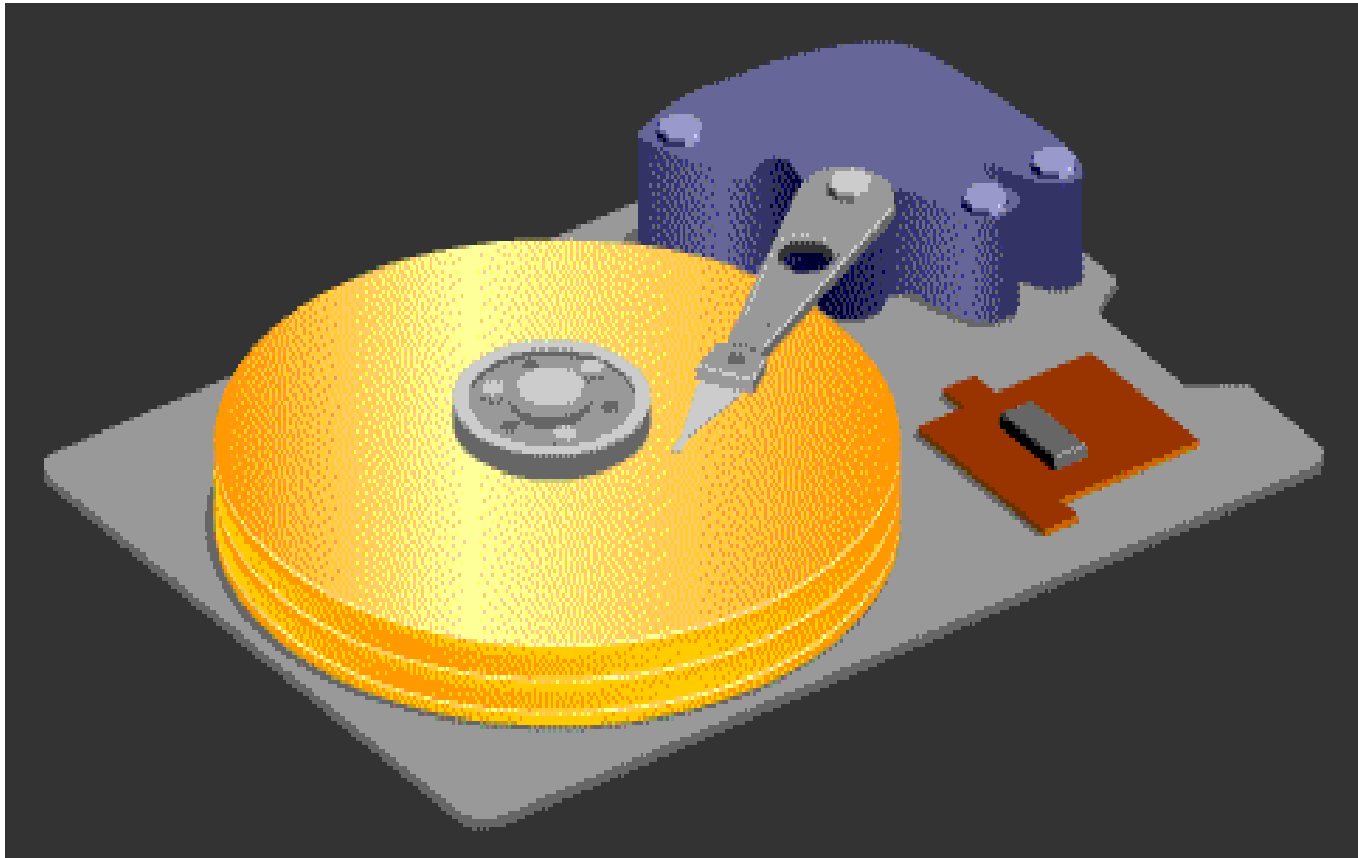


a paměť



První spintronické prvky v magnetických senzorech

Dnes ve všech počítačích



Spintronická operační paměť v čipu - MRAM



První 4Mb MRAM 2006
Dnes 32Mb

RAM čip, který nezapomíná → nehybný „pevný disk“

Spintronika dnes umožňuje integraci funkcí zapisování, ukládání a čtení informace v jediném elektronickém prvku

... už je třeba jen přidat zpracování informace čili

Spintronický transistor

Klasický transistor

Jeden přístup: udělat z obyčejného polovodiče feromagnetický

Zatlouct železný hřebík do křemíkové desky není správná cesta

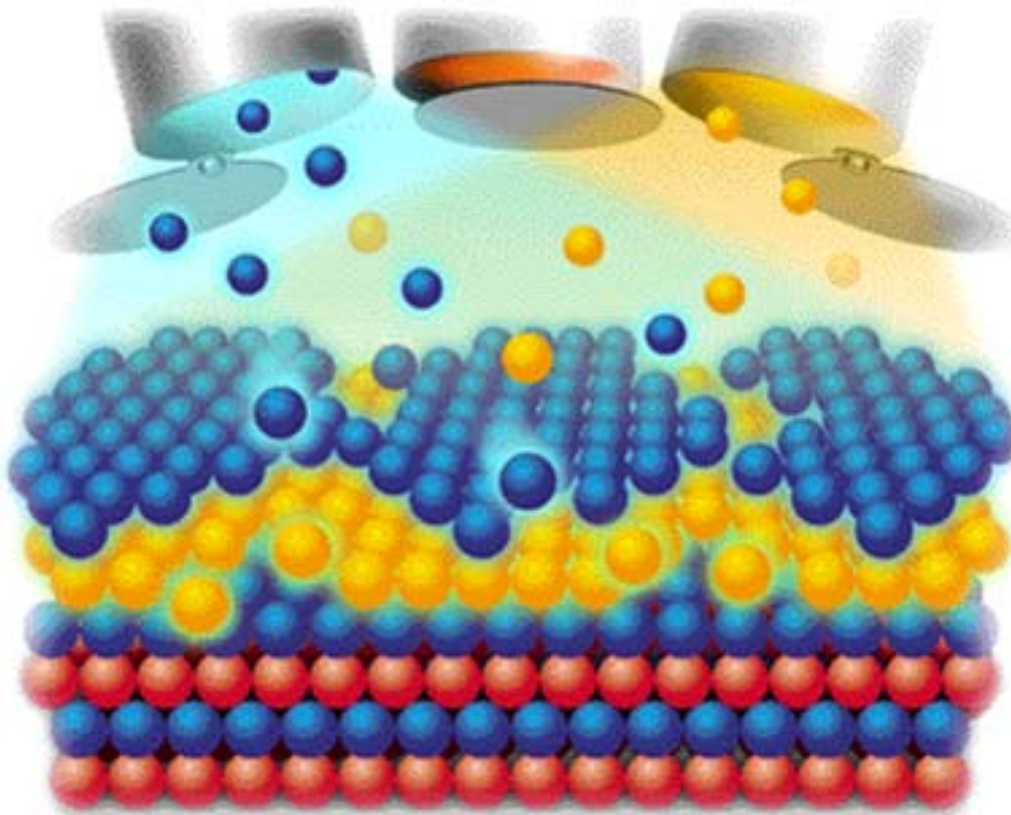


Periodic Table of the Elements

H	He																	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar								
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr								
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe								
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn								
Fr	Ra	Ac	Rf	Ha	Sg												Uu								
		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu										
		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr										

Stavebnice z jednotlivých atomů

Růst po atomových vrstvách



Periodic Table of the Elements

Li	Be											B	C	N	O	F	Ne		
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
Fr	Ra	Ac	Rf	Ha	Sg												Cn	Fl	Og
		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Stavebnice z jednotlivých atomů

Čisto (vakuum) jako v mezihvězdném prostoru



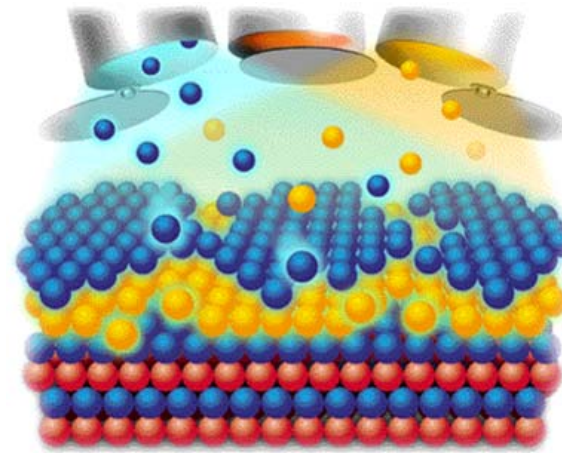
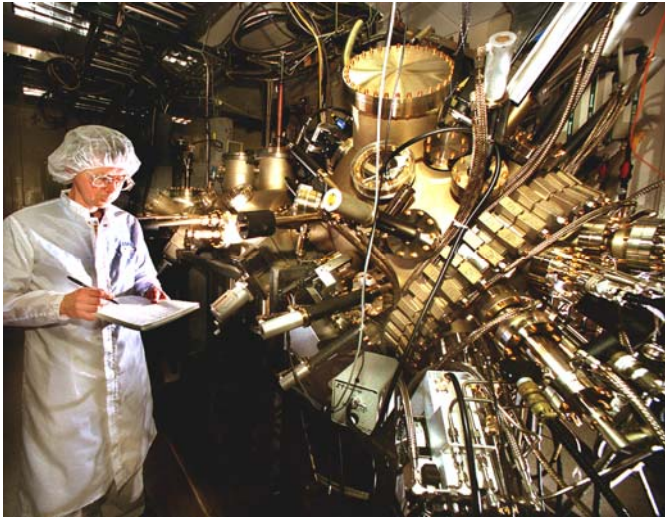
10^{-6} to 10^{-17} mbar



10^{-9} to 10^{-12} mbar

Jeden přístup: udělat z obyčejného polovodiče feromagnetický

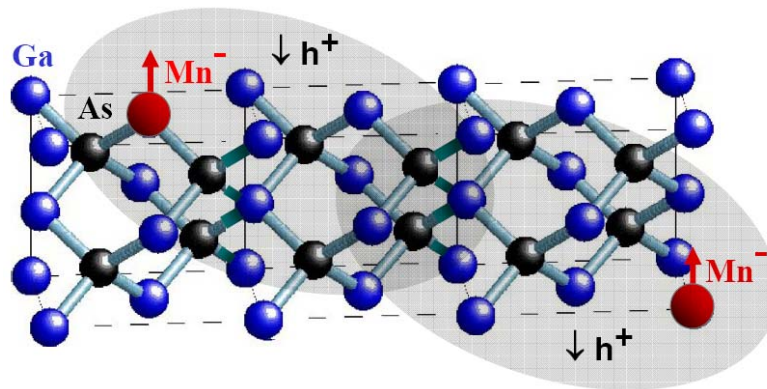
Růst Mn-dopovaného GaAs s atomovou přesností



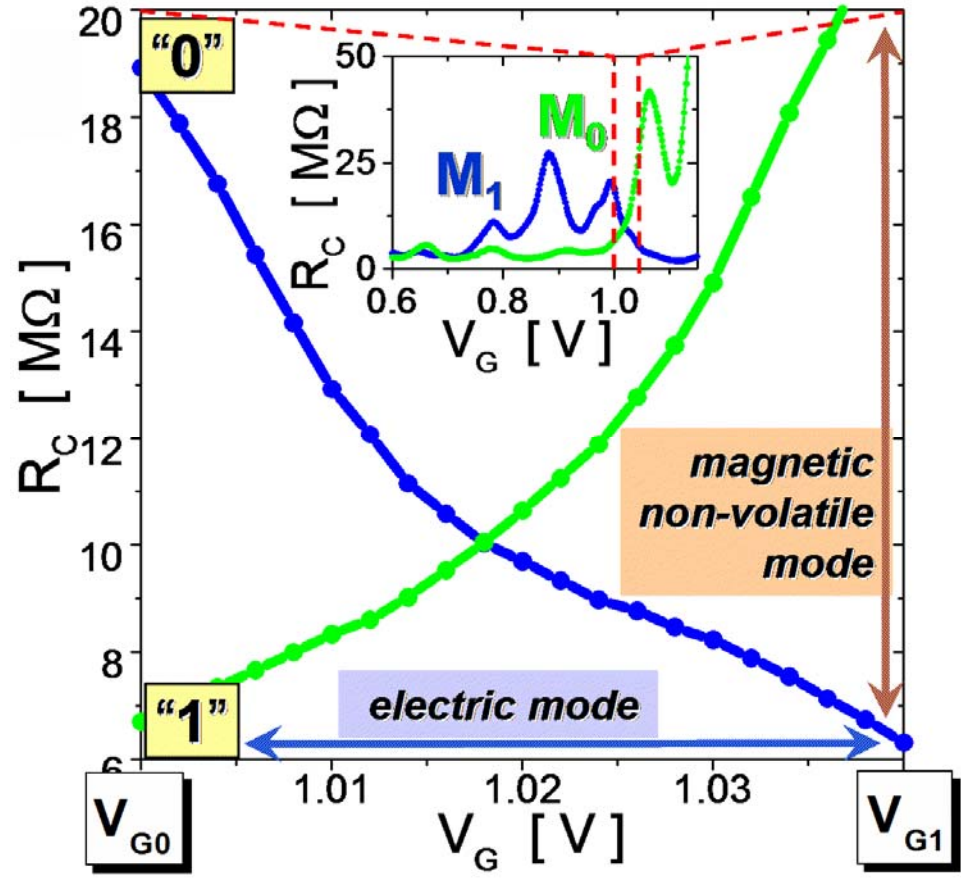
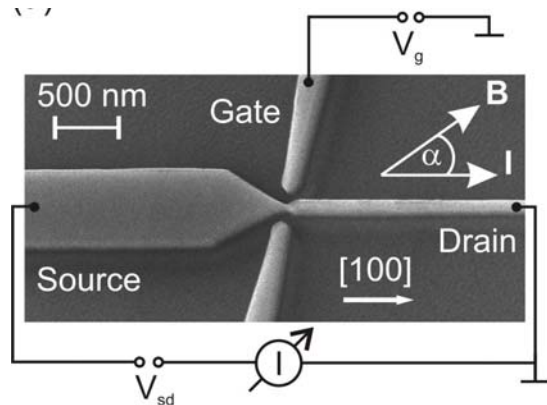
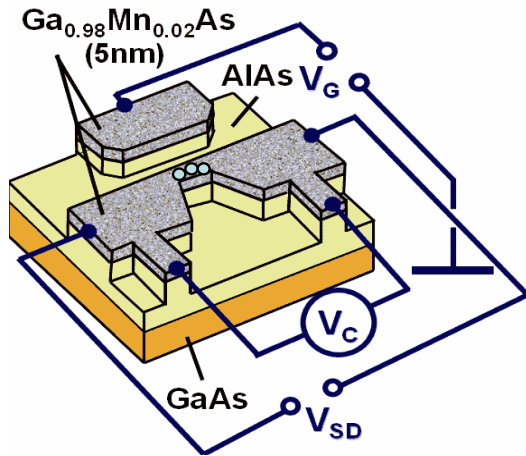
GaAs – standardní III-V polovodič

Group-II Mn – magnetické momenty
a díry

GaAs:Mn – feromagnetický a elektricky
dopovaný polovodič



Pomocí nano-litografie lze sestavit spintronický transistor

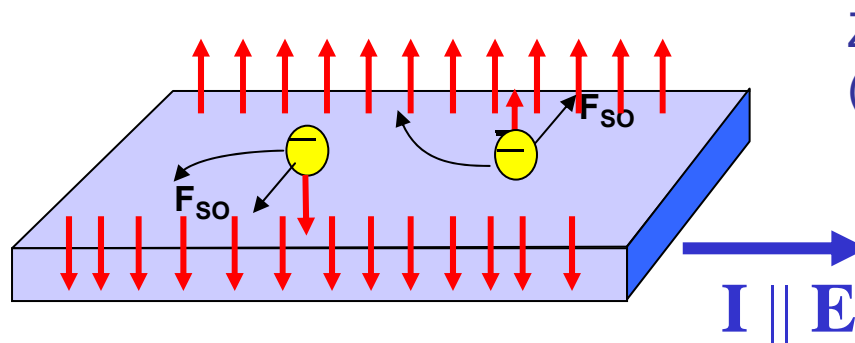
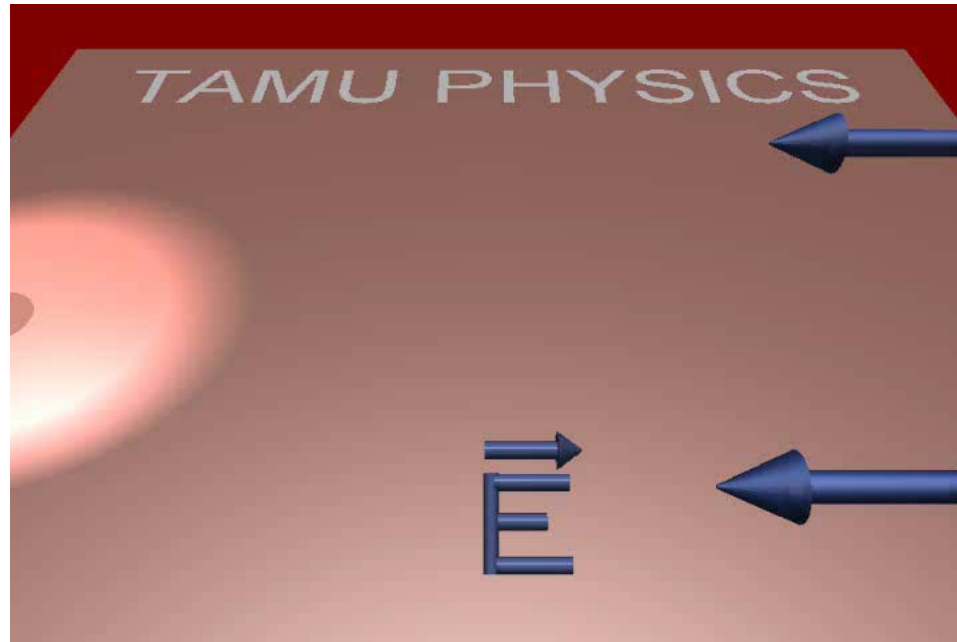


p- nebo n-tykový transistor podle orientace spinů

Feromagnetismus jen při nízkých teplotách (<200 Kelvinů v GaMnAs)

Jiná možnost je ochočit spiny v nemagnetickém polovodiči

Spin závisí na pohybu elektronu



Zmagnetované hrany
(spinový Hallův jev)



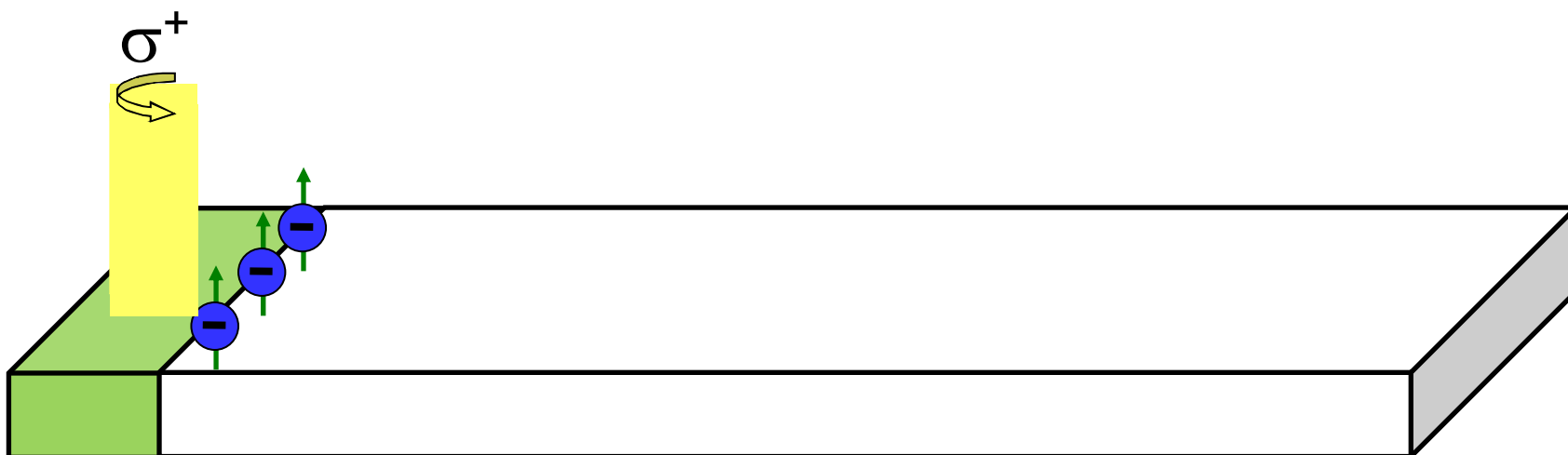
Spinový Hallový mikročip



Supravodivý magnet

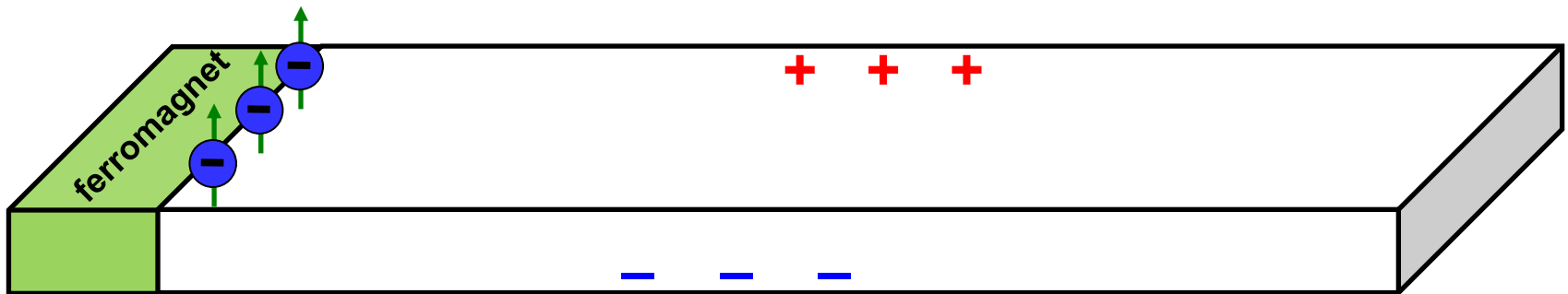
Stejná magnetizace v polovodiči dosažená pomocí milionkrát menších proudů i rozměrů

Spiny v polovodiči se dají ještě víc zkrotit



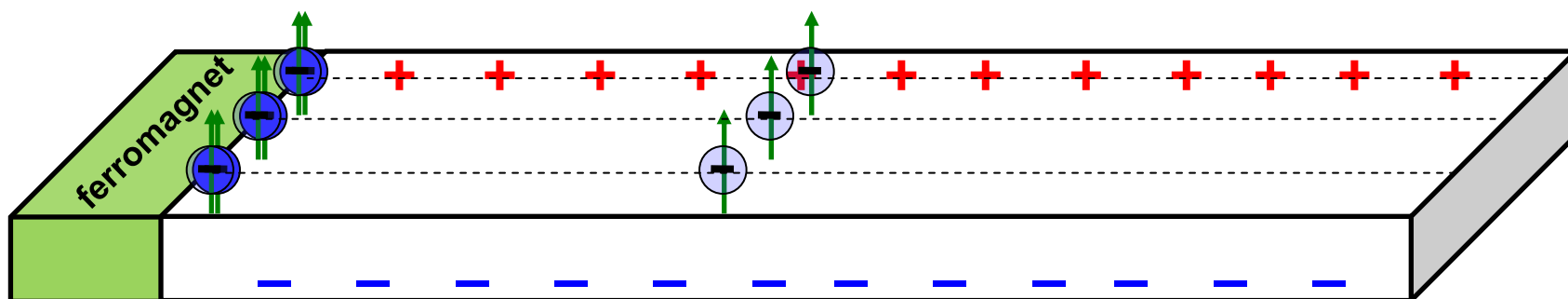
Injektované spinově polarizované proudy budí příčné elektrické napětí

Spiny v polovodiči se dají ještě víc zkrotit



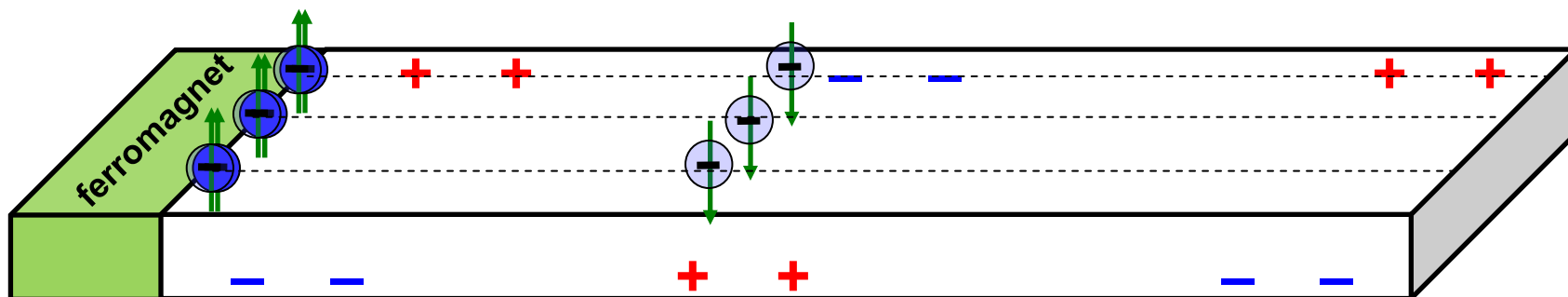
Injektované spinově polarizované proudy budí příčné elektrické napětí

Spiny v polovodiči se dají ještě víc zkrotit



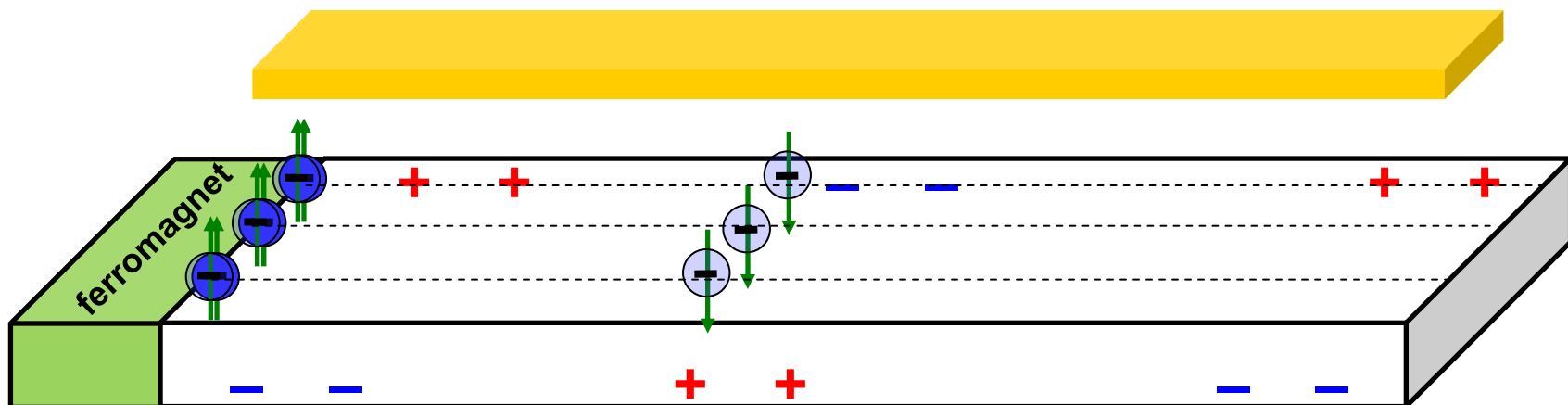
Ustálený stav

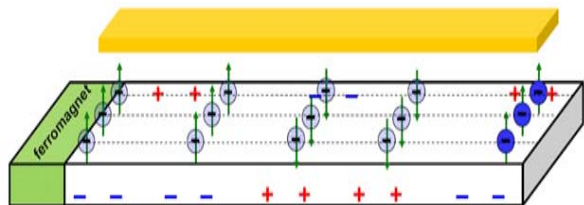
Spiny v polovodiči se dají ještě víc zkrotit



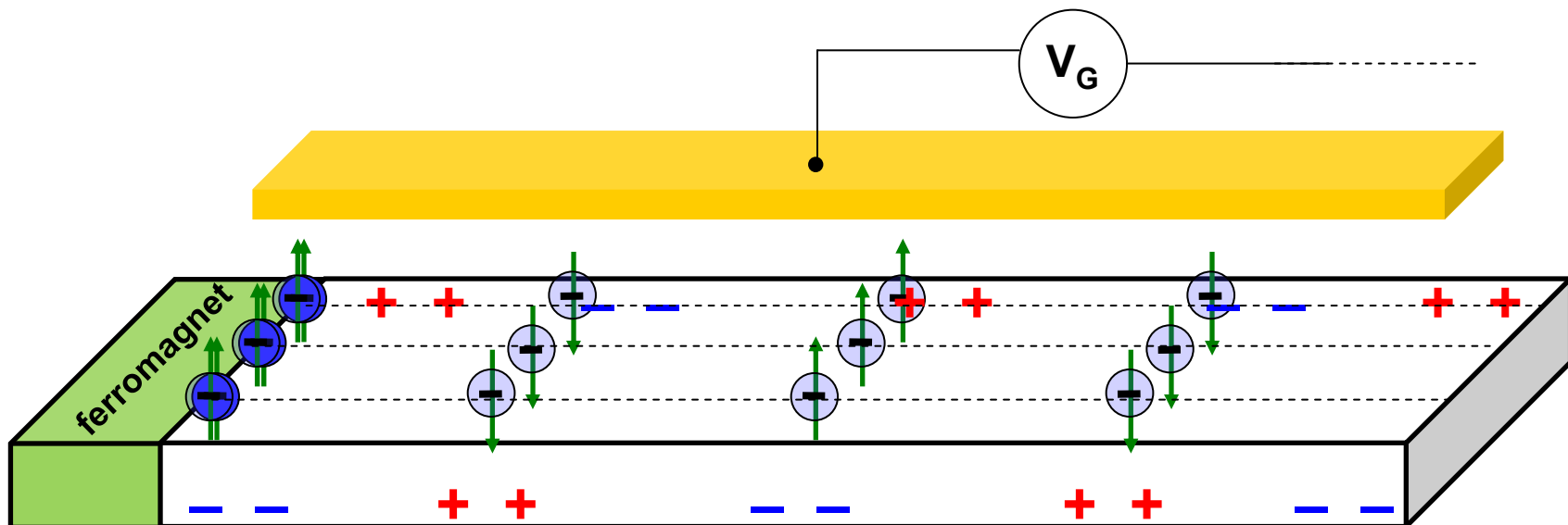
Spiny působí na proud ale i proud může působit na spiny

Spintronický transistor





Spintronický transistor



Budoucnost mikroelektroniky „ve hvězdách“ ...

.... spintronika jednou z možných cest

.... která se učí z kvantové relativistické fyziky a skládání látek z jednotlivých atomů....

.... využívá spin elektronu samostatně nebo svázaného s pohybem náboje v elektrickém a magnetickém poli

.... úspěšně nahrazuje nebo integruje prvky pro ukládání a čtení informace

.... zpracování informace zatím na úrovni prototypů jednotlivých spintronických transistorů