

Kvantumszimulátorok

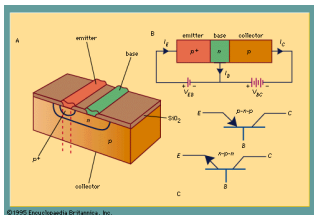


Szirmai Gergely

MTA SZFKI

Graphics: Harald Ritsch / Rainer Blatt, IQOQI

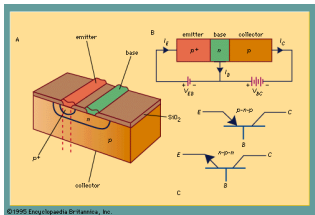
A kvantummechanika körülvesz



©1995 Encyclopædia Britannica, Inc.

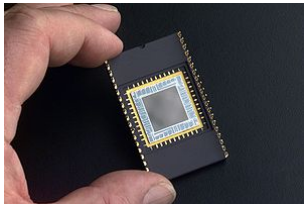
tranzisztor
számítógép, mobiltelefon

A kvantummechanika körülvesz

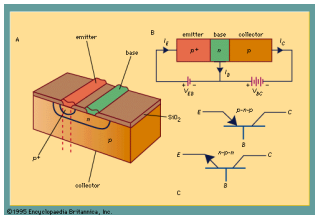


tranzisztor
számítógép, mobiltelefon

CCD kamera
fényképező, orvosi műszerek

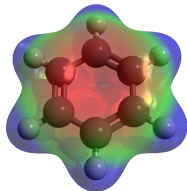
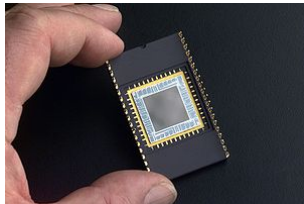


A kvantummechanika körülvesz



tranzisztor
számítógép, mobiltelefon

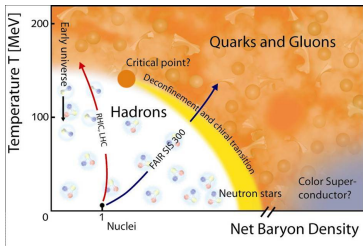
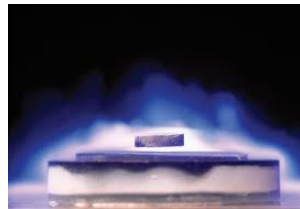
CCD kamera
fényképező, orvosi műszerek



kémiai vegyületek
vegyipar, modern gyógyszeripar

A kvantummechanika körülvesz (és amit még nem értünk pontosan)

magas hőmérsékletű szupravezetés



erős kölcsönhatás
kvark-gluon plazma

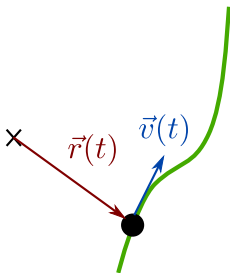
Igény a rendszerek viselkedésének "olcsó"
modellezésére



SZIMULÁCIÓ

Szimuláció a klasszikus fizikában

Tömegpont dinamikája



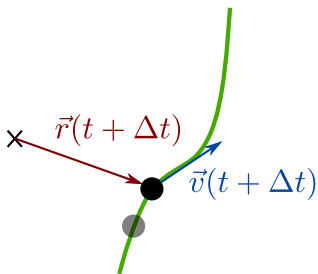
mozgás leírása: pálya meghatározása

Mi kell hozzá?

hely(vektor): $\vec{r}(t)$
sebességvektor: $\vec{v}(t)$

Szimuláció a klasszikus fizikában

Tömegpont dinamikája



mozgás leírása: pálya meghatározása

Mi kell hozzá?

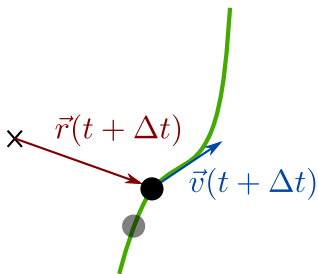
hely(vektor): $\vec{r}(t)$
sebességvektor: $\vec{v}(t)$

$\vec{r}(t), \vec{v}(t)$ ismertek 

$$\vec{r}(t + \Delta t) = \vec{r}(t) + \vec{v}(t) \Delta t$$

Szimuláció a klasszikus fizikában

Tömegpont dinamikája



mozgás leírása: pálya meghatározása

Mi kell hozzá?

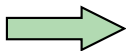
hely(vektor): $\vec{r}(t)$
sebességvektor: $\vec{v}(t)$

$\vec{r}(t), \vec{v}(t)$ ismertek 

$$\vec{r}(t + \Delta t) = \vec{r}(t) + \vec{v}(t) \Delta t$$

$\vec{F}(\vec{r}, \vec{v})$ ismert

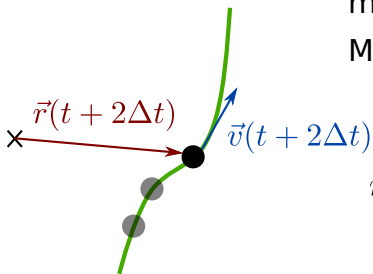
$$\vec{F} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$



$$\vec{v}(t + \Delta t) = \vec{v}(t) + \frac{1}{m} \vec{F} \Delta t$$

Szimuláció a klasszikus fizikában

Tömegpont dinamikája



mozgás leírása: pálya meghatározása

Mi kell hozzá?

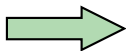
hely(vektor): $\vec{r}(t)$
sebességvektor: $\vec{v}(t)$

$\vec{r}(t), \vec{v}(t)$ ismertek 

$$\vec{r}(t + \Delta t) = \vec{r}(t) + \vec{v}(t) \Delta t$$

$\vec{F}(\vec{r}, \vec{v})$ ismert

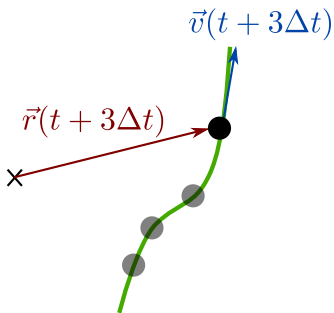
$$\vec{F} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$



$$\vec{v}(t + \Delta t) = \vec{v}(t) + \frac{1}{m} \vec{F} \Delta t$$

Szimuláció a klasszikus fizikában

Tömegpont dinamikája



mozgás leírása: pálya meghatározása

Mi kell hozzá?

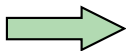
hely(vektor): $\vec{r}(t)$
sebességvektor: $\vec{v}(t)$

$\vec{r}(t), \vec{v}(t)$ ismertek 

$$\vec{r}(t + \Delta t) = \vec{r}(t) + \vec{v}(t) \Delta t$$

$\vec{F}(\vec{r}, \vec{v})$ ismert

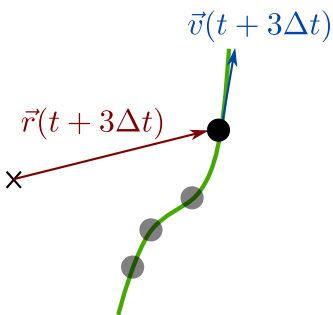
$$\vec{F} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$



$$\vec{v}(t + \Delta t) = \vec{v}(t) + \frac{1}{m} \vec{F} \Delta t$$

Szimuláció a klasszikus fizikában

Tömegpont dinamikája



mozgás leírása: pálya meghatározása

Mi kell hozzá?

hely(vektor): $\vec{r}(t)$
sebességvektor: $\vec{v}(t)$

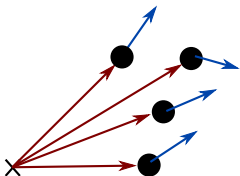
$\vec{r}(t), \vec{v}(t)$

ÁLLAPOT

Ha az állapot (és az erőtvény) ismert, akkor a többi időre már könnyedén megoldható.

Szimuláció a klasszikus fizikában

Pontrendszer dinamikája



Tömegpontok száma: N

Állapothatározók száma: $2N$

helyvektorok: $\vec{r}_1(t), \vec{r}_2(t) \dots \vec{r}_N(t)$

sebességvektorok: $\vec{v}_1(t), \vec{v}_2(t) \dots \vec{v}_N(t)$

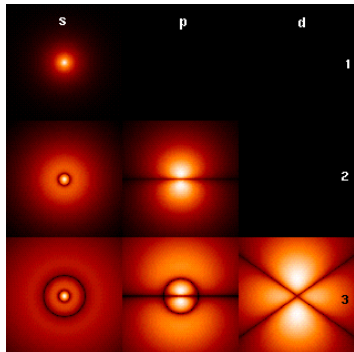
$\vec{r}_1(t), \vec{r}_2(t) \dots \vec{r}_N(t), \vec{v}_1(t), \vec{v}_2(t) \dots \vec{v}_N(t)$

ÁLLAPOT

Ha az állapot (és az erőtvény) ismert, akkor a többi időre már könnyedén megoldható.
2N ismeretlen, 2N egyenlet

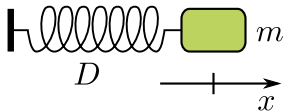
Kvantummechanika

Mik is azok a kvantumrendszerek?



Kvantummechanika

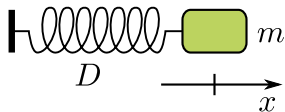
Klasszikus állapotér



rugóra kötött test

Kvantummechanika

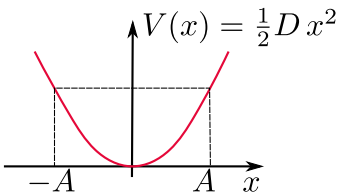
Klasszikus állapotér



rugóra kötött test

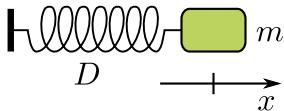
Munkatétel:

$$E = K + V = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} D x^2$$

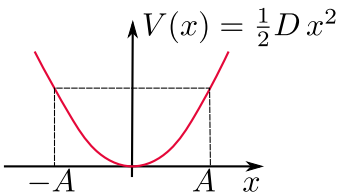


Kvantummechanika

Klasszikus állapotér

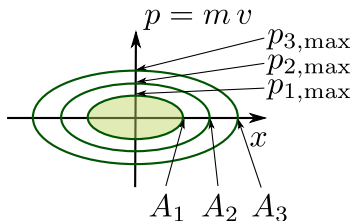


rugóra kötött test



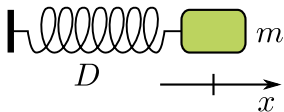
Munkatétel:

$$E = K + V = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} D x^2$$

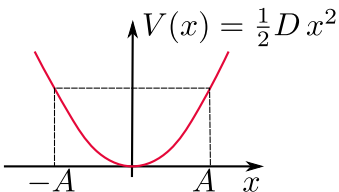


Kvantummechanika

Klasszikus állapotter



rugóra kötött test

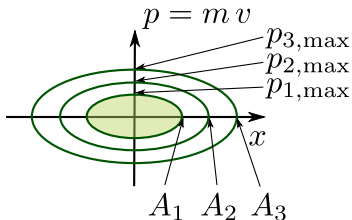


Munkatétel:

$$E = K + V = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} D x^2$$

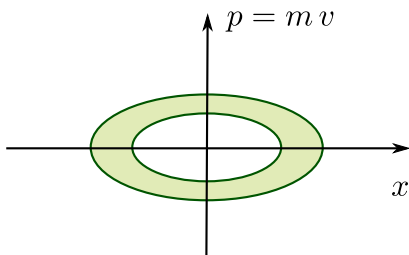
Terület:

$$S = A p_{\max} \pi$$



Kvantummechanika

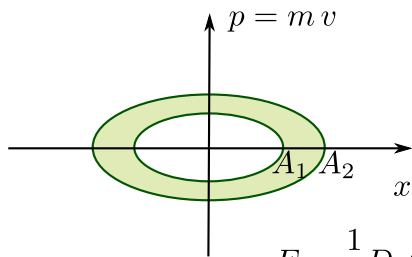
Klasszikus állapottér



Klasszikusan bármely pályaváltoztatás lehetséges, csak a területkülönbségnek megfelelő hatást kell közölni.

Kvantummechanika

Klasszikus állapottér



Klasszikusan bármely pályaváltoztatás lehetséges, csak a területkülönbségnek megfelelő hatást kell közölni.

Példa:

$$m = 10 \text{ g}$$

$$D = 0,01 \frac{\text{N}}{\text{cm}}$$

$$A_1 = 1 \text{ cm}$$

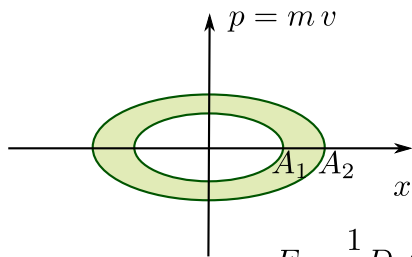
$$A_2 = 1,5 \text{ cm}$$

$$E = \frac{1}{2} D A^2 = \frac{p_{\max}^2}{2m}$$

$$S_2 - S_1 = p_{2,\max} A_2 \pi - p_{1,\max} A_1 \pi \approx 3,93 \cdot 10^{-5} \text{ Js}$$

Kvantummechanika

Klasszikus állapottér



Klasszikusan bármely pályaváltoztatás lehetséges, csak a területkülönbségnek megfelelő hatást kell közölni.

Példa:

$$\left. \begin{aligned} m &= 10 \text{ g} \\ D &= 0,01 \frac{\text{N}}{\text{cm}} \\ A_1 &= 1 \text{ cm} \\ A_2 &= 1,5 \text{ cm} \end{aligned} \right\}$$

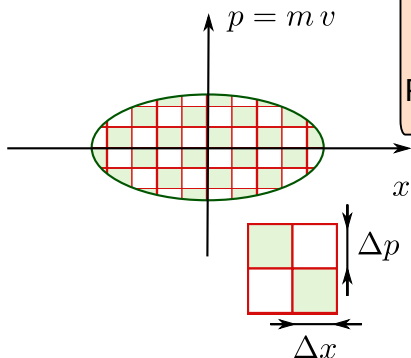
$$E = \frac{1}{2} D A^2 = \frac{p_{\max}^2}{2m}$$

$$S_2 - S_1 = p_{2,\max} A_2 \pi - p_{1,\max} A_1 \pi \approx 3,93 \cdot 10^{-5} \text{ Js}$$

Ez egy nagyon nagy szám!

Kvantummechanika

Kváziklasszikus állapot tér



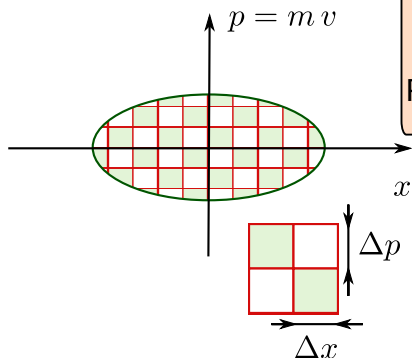
Minimális területváltozás
mértéke egy univerzális állandó.
Planck-állandó: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Egy cella mérete:

$$\Delta x \cdot \Delta p = h$$

Kvantummechanika

Kváziklasszikus állapotter



Minimális területváltozás
mértéke egy univerzális állandó.
Planck-állandó: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

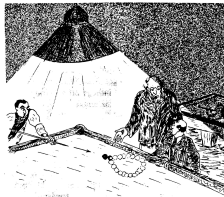
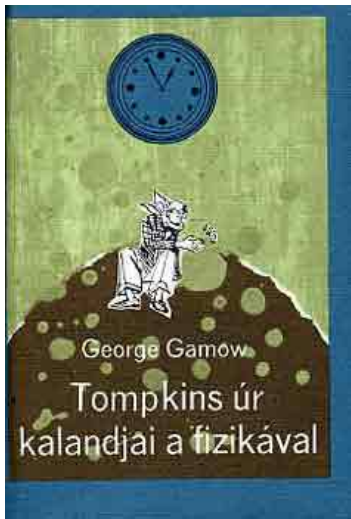
Egy cella mérete:

$$\Delta x \cdot \Delta p = h$$

Azért tűnik furcsának a kvantummechanika, mert túl kicsi a Planck-állandó. Nem tapasztaljuk hétköznapjainkban.

Kvantummechanika

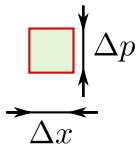
Milyen világot látnánk, ha a Planck-állandó 1 Js lenne?



Kvantummechanika

Kvantummechanikai állapottér

egy cellánál jobban nem tudjuk semmiképp se megmondani, hogy hol van a részecske



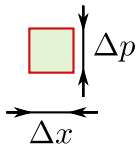
Kvantummechanika

Kvantummechanikai állapottér

egy cellánál jobban nem tudjuk semmiképp se megmondani, hogy hol van a részecske



nincs pontos hely és sebesség egyszerre



Kvantummechanika

Kvantummechanikai állapottér

egy cellánál jobban nem tudjuk semmiképp se megmondani, hogy hol van a részecske

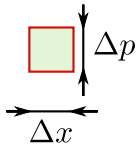


nincs pontos hely és sebesség egyszerre

de Broglie-hipotézis:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

pont egész számszor fér rá a hullám a pályára
konstruktív interferencia



Kvantummechanika

Kvantummechanikai állapottér

egy cellánál jobban nem tudjuk semmiképp se megmondani, hogy hol van a részecske



nincs pontos hely és sebesség egyszerre

de Broglie-hipotézis:

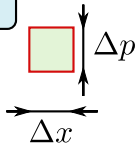
$$\lambda = \frac{h}{p}$$



anyag hullám

$$\psi(x)$$

pont egész számszor fér rá a hullám a pályára
konstruktív interferencia



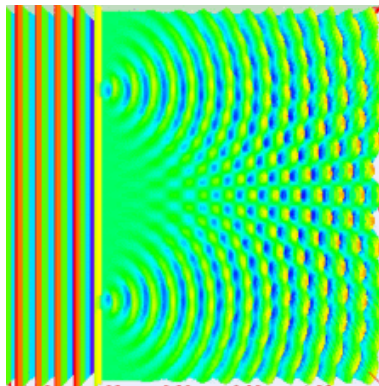
Kvantummechanika

Kvantummechanikai állapottér

de Broglie-hipotézis:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

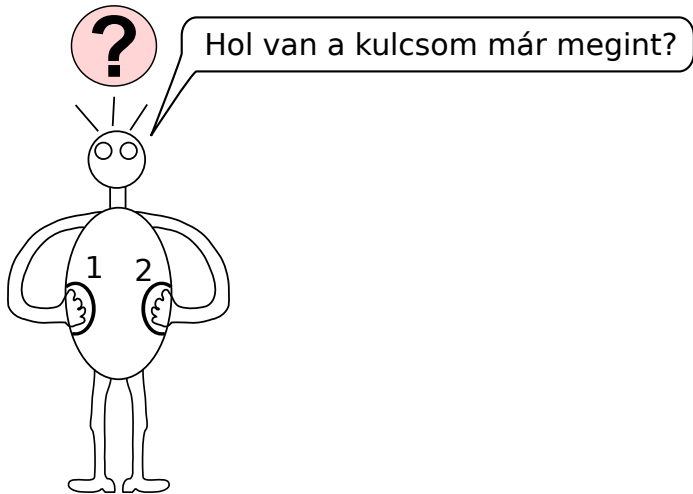
két rés kísérlet



komplementaritás

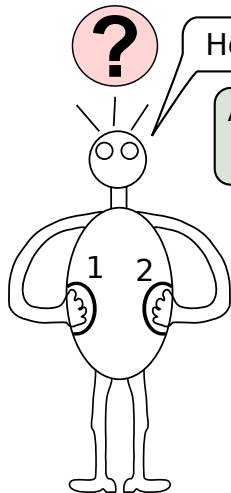
Kvantummechanika

Egyszerű példa: Kvantumkulcscsomó



Kvantummechanika

Egyszerű példa: Kvantumkulcsosomó



Hol van a kulcsom már megint?

Az állapotot két szám írja le:
 $\Psi(1)$, $\Psi(2)$

	1	2	} x
egyenletesen találok meg	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	
mindig jobb zseb	1	0	} $\Psi(x)$
mindig bal zseb	0	1	

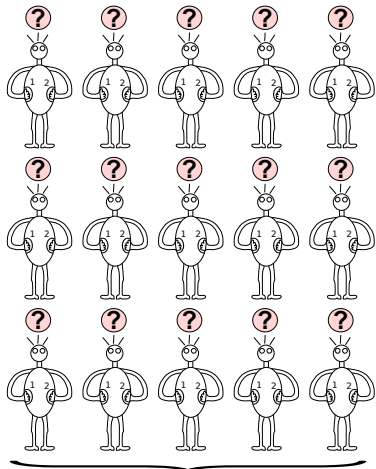
$$P(\text{a kulcsot a jobb zsebemben találok meg}) = |\Psi(1)|^2$$

$$P(\text{a kulcsot a bal zsebemben találok meg}) = |\Psi(2)|^2$$

$$|\Psi(1)|^2 + |\Psi(2)|^2 = 1$$

Kvantummechanika sok részecskére

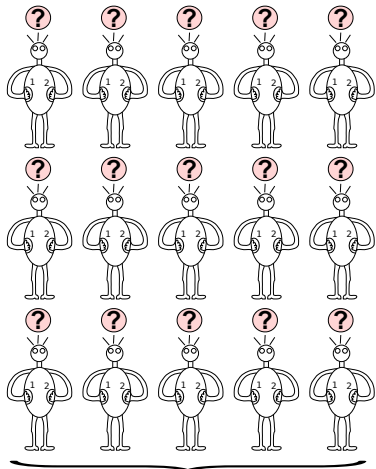
Teremnyi kulcscsomó



N ember N kulcscsomó

Kvantummechanika sok részecskére

Teremnyi kulcscsomó



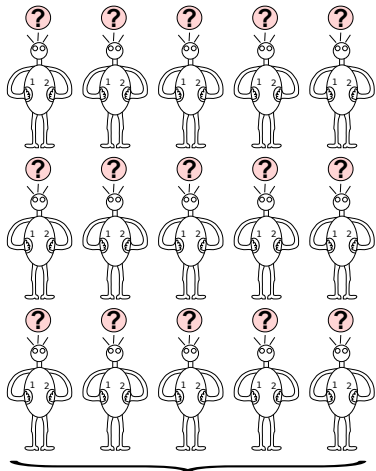
N ember N kulcscsomó

Mivel írhatjuk le az állapotot?

N	klasszikus	kvantum

Kvantummechanika sok részecskére

Teremnyi kulcsosomó



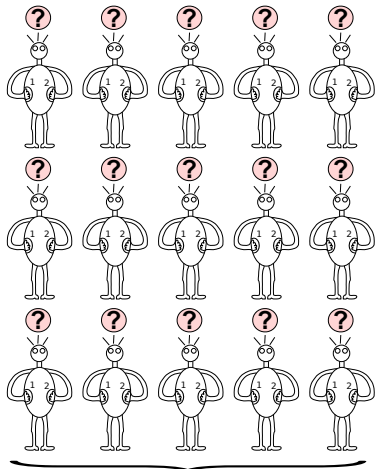
N ember N kulcsosomó

Mivel írhatjuk le az állapotot?

N	klasszikus	kvantum
1	1 bit	2 szám = 1 qubit
2	2 bit	4 szám = 2 qubit
3	3 bit	8 szám = 3 qubit

Kvantummechanika sok részecskére

Teremnyi kulcscsomó



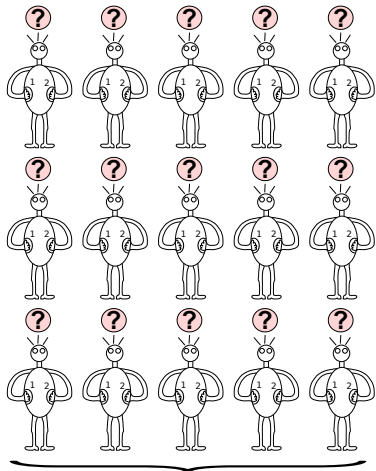
N ember N kulcscsomó

Mivel írhatjuk le az állapotot?

N	klasszikus	kvantum
1	1 bit	2 szám = 1 qubit
2	2 bit	4 szám = 2 qubit
3	3 bit	8 szám = 3 qubit
300	300 bit	$2 \cdot 10^{90}$ szám = 300 qubit
N	N bit	2^N szám = N qubit

Kvantummechanika sok részecskére

Teremnyi kulcscsomó



N ember N kulcscsomó

Mivel írhatjuk le az állapotot?

N	klasszikus	kvantum
1	1 bit	2 szám = 1 qubit
2	2 bit	4 szám = 2 qubit
3	3 bit	8 szám = 3 qubit
300	300 bit	$2 \cdot 10^{90}$ szám = 300 qubit
N	N bit	2^N szám = N qubit

$2 \cdot 10^{90} >$ a világegyetem összes részecskéinek száma

Nem lehet számítógéppel!

Kvantumszimulátorok

Feynman '82:

Egy kvantumrendszer viselkedését legjobban egy másik kvantumrendszer utánozza.

Ha nem számítógéppel szimuláljuk, akkor mi értelme van?

Kvantumszimulátorok

Feynman '82:

Egy kvantumrendszer viselkedését legjobban egy másik kvantumrendszer utánozza.

Ha nem számítógéppel szimuláljuk, akkor mi értelme van?

érdekes jelenség

bonyolult
rendszer

**nehéz vele
kísérletezni**

Kvantumszimulátorok

Feynman '82:

Egy kvantumrendszer viselkedését legjobban egy másik kvantumrendszer utánozza.

Ha nem számítógéppel szimuláljuk, akkor mi értelme van?

érdekes jelenség

bonyolult
rendszer

nehéz vele
kísérletezni



elméleti
modell

nehéz tesztelni

Kvantumszimulátorok

Feynman '82:

Egy kvantumrendszer viselkedését legjobban egy másik kvantumrendszer utánozza.

Ha nem számítógéppel szimuláljuk, akkor mi értelme van?

érdekes jelenség

bonyolult
rendszer

nehéz vele
kísérletezni

elméleti
modell

nehéz tesztelni

kontrollálható
rendszer

a paraméterek jól
kézben tarthatók

Kvantumszimulátorok

Feynman '82:

Egy kvantumrendszer viselkedését legjobban egy másik kvantumrendszer utánozza.

Ha nem számítógéppel szimuláljuk, akkor mi értelme van?

érdekes jelenség

bonyolult rendszer

nehéz vele kísérletezni

elméleti modell

nehéz tesztelni

kontrollálható rendszer

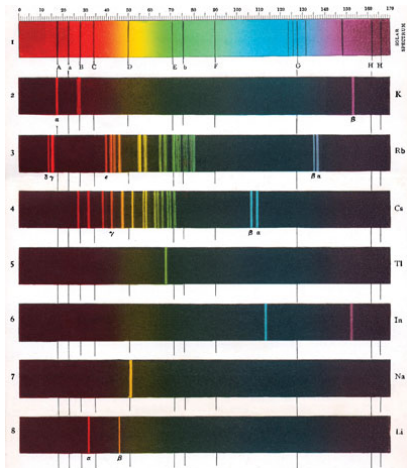
a paraméterek jól kézben tarthatók

érdekes jelenség

Ultrahideg atomok

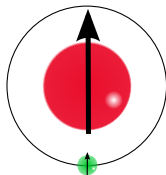
alkáli atomok: 1 e^- a külső héjon

színképük a látható fény tartományába esik



lézerdiodával könnyű átmenetet okozni

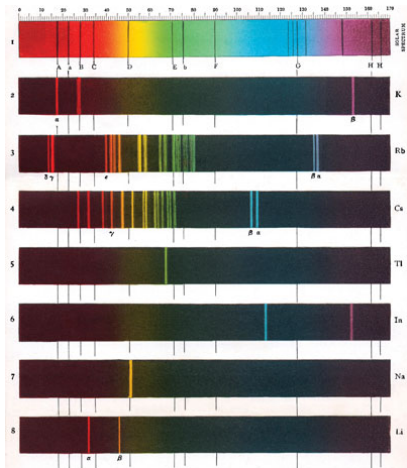
külső betöltött héj



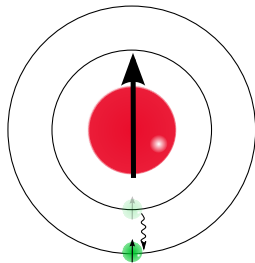
Ultrahideg atomok

alkáli atomok: 1 e^- a külső héjon

színképük a látható fény tartományába esik



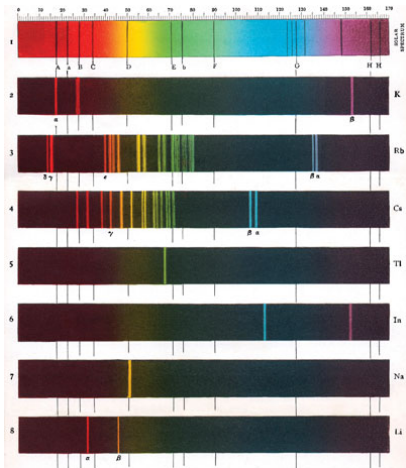
lézerdiódával könnyű átmenetet okozni



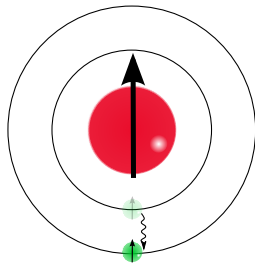
Ultrahideg atomok

alkáli atomok: 1 e^- a külső héjon

színképük a látható fény tartományába esik



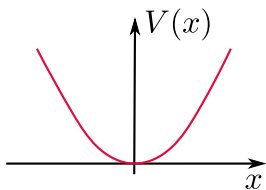
lézerdiódával könnyű átmenetet okozni



rezonancia közelében erős a fény mechanikai hatása

Ultrahideg atomok

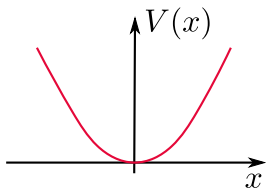
Potenciál csapdákat lehet vele készíteni:



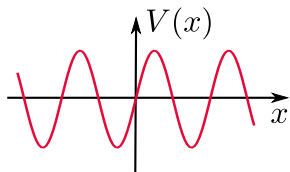
harmonikus csapda

Ultrahideg atomok

Potenciál csapdákat lehet vele készíteni:



harmonikus csapda

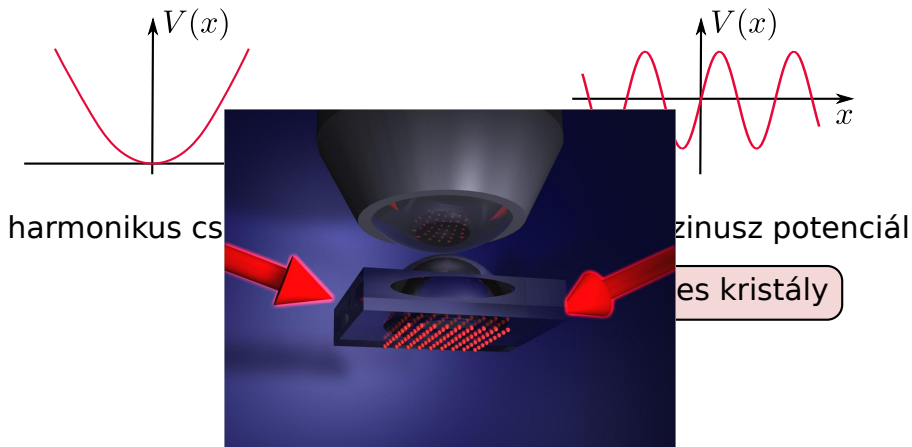


periodikus szinusz potenciál

tökéletes kristály

Ultrahideg atomok

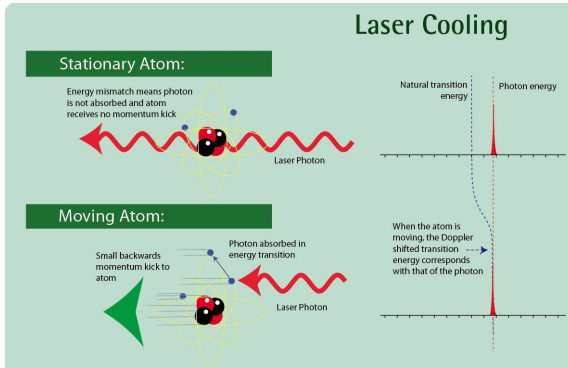
Potenciál csapdákat lehet vele készíteni:



tetszőleges potenciál létrehozása "vetítéssel"

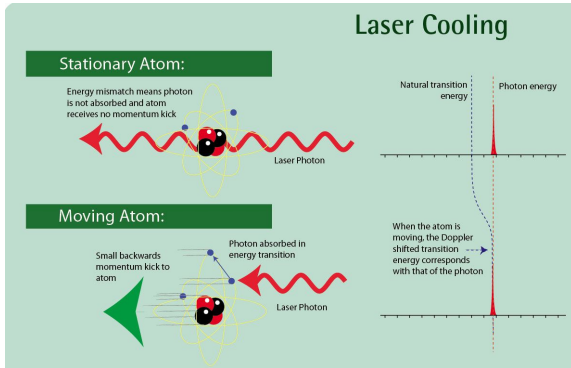
Ultrahideg atomok

Hűteni lehet vele az atomokat:



Ultrahideg atomok

Hűteni lehet vele az atomokat:

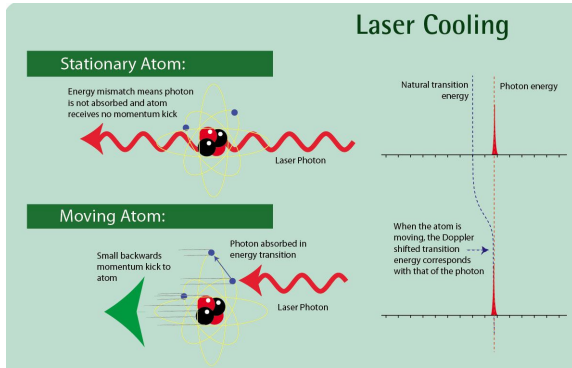


$$T = 10 \dots 100 \text{ nK}$$
$$= 10^{-8} \dots 10^{-7} \text{ K}$$

A leghidegebb anyag az univerzumban.

Ultrahideg atomok

Hűteni lehet vele az atomokat:



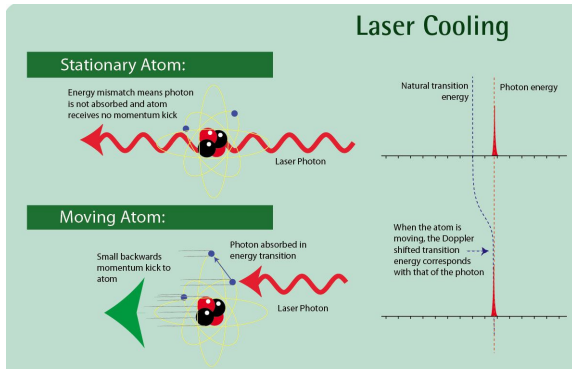
$$T = 10 \dots 100 \text{ nK}$$
$$= 10^{-8} \dots 10^{-7} \text{ K}$$

A leghidegebb anyag az univerzumban.

Miért jók a hideg atomok?

Ultrahideg atomok

Hűteni lehet vele az atomokat:



$$T = 10 \dots 100 \text{ nK} \\ = 10^{-8} \dots 10^{-7} \text{ K}$$

A leghidegebb anyag az univerzumban.

Miért jók a hideg atomok?

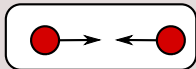
Minél alacsonyabb a hőmérséklet annál kvantumosan viselkednek.

Ultrahideg atomok

Kölcsönhatás tetszőlegesen hangolható:



nincs ütközés



van ütközés

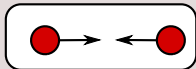
nagyon rövid hatótávolságú
kölcsönhatás

Ultrahideg atomok

Kölcsönhatás tetszőlegesen hangolható:

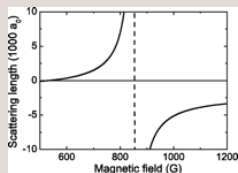


nincs ütközés



van ütközés

nagyon rövid hatótávolságú
kölcsönhatás



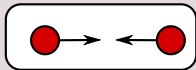
de az ereje és
jellege hangolható

Ultrahideg atomok

Kölcsönhatás tetszőlegesen hangolható:

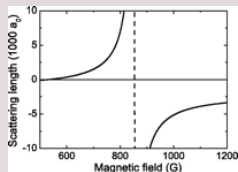


nincs ütközés



van ütközés

nagyon rövid hatótávolságú
kölcsönhatás



de az ereje és
jellege hangolható

- kölcsönhatás jellege: vonzó vagy taszító
- kölcsönhatás ereje: ideális gáztól a "neutroncsillagig"

Összefoglalás

Ultrahideg atomok paramétereit:

- hőmérséklet: $10 \text{ nK} \dots 1 \mu\text{K}$
- méret: $100 \text{ nm} \dots 1 \text{ mm}$
- atomszám: $1.000 \dots 10.000.000$
- kölcsönhatás jellege: vonzó vagy tasztító
- kölcsönhatás ereje: ideális gáztól a "neutroncsillag"

