

Az atomoktól a csillagokig

Közérthető fizika, nem csak középiskolásoknak

A tudatlanság néha áldás – avagy mekkora a laborban létrehozott ősrobbanás

Csanád Máté

ELTE Atomfizikai Tanszék

<http://csanad.web.elte.hu/>

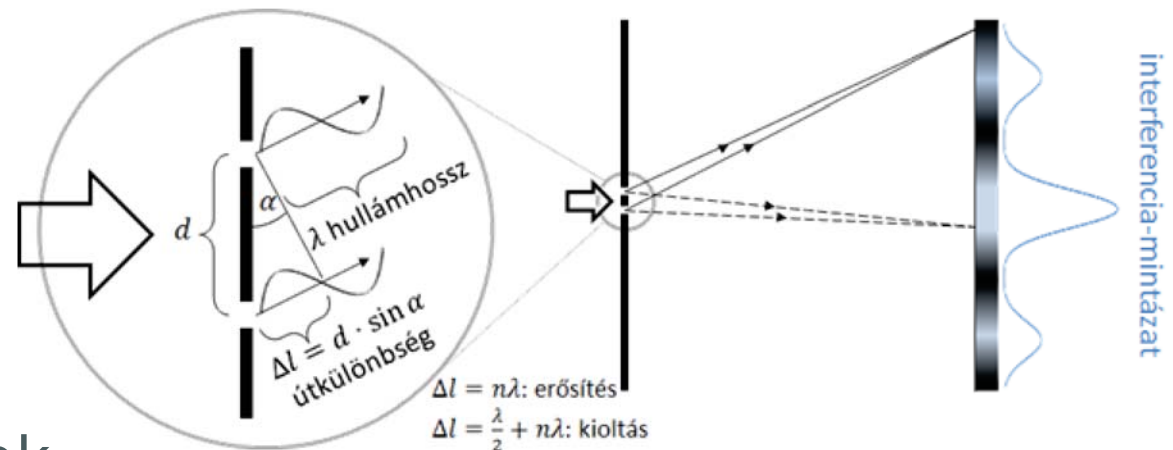
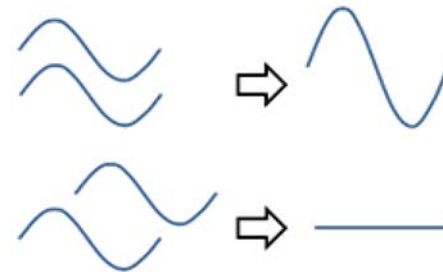
2014. december 11.

Az előadás vázlatja

- A fény természete: hullám és részecske!
- Egyfotonos interferencia és a HBT-effektus
- A kvantumfizika alapjai
- Kvantumstatisztika, Bose–Einstein-korrelációk
- Femtoszkópia
- Ősrobbanás a laborban

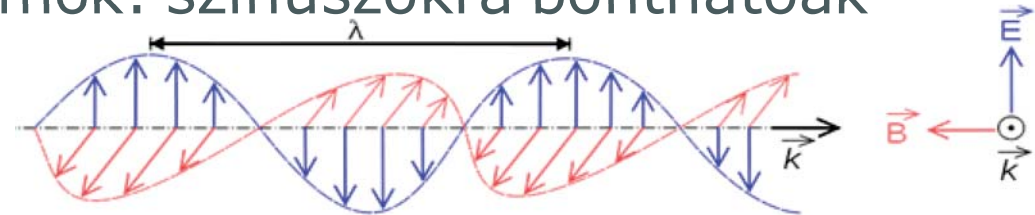
A fény hullámtermészete

- Young és Fresnel, XIX. sz., interferencia: a fény hullám
 - Hullám: térben és időben változó fizikai mennyiség
 - Két hullám találkozása: erősítés vagy gyengítés
- Mi hullámozik? Maxwell: elektromágneses tér
- A beérkező energiát észleljük
- Kétrés-kísérlet: a két pontból érkező fény hol kioltja, hol erősíti egymást
- Sötét és világos foltok

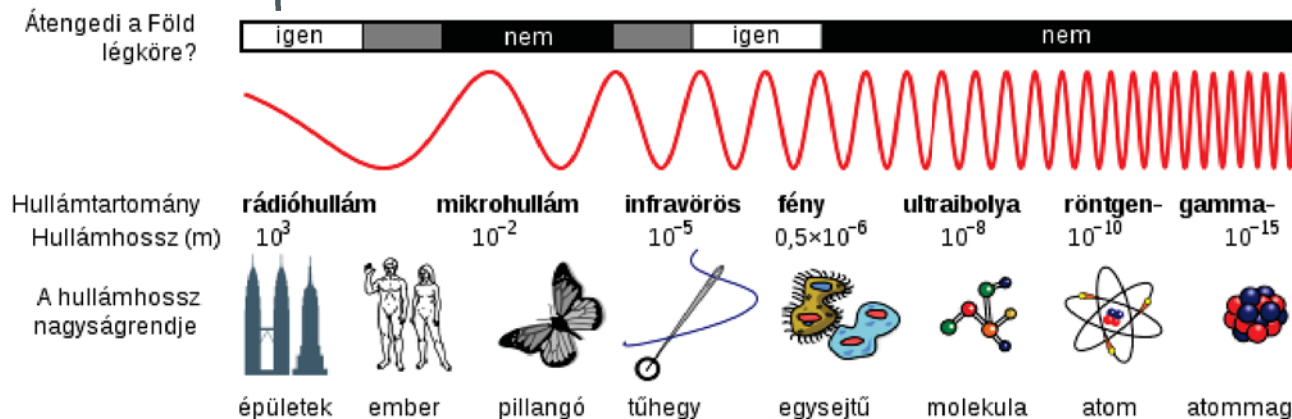


Elektromágneses hullámok

- Hullámalak (egy adott időpillanatban): $f(x) = f_0 \sin(2\pi x/\lambda)$
 - Itt $x = \lambda$ esetén ismétlődés: λ a hullámhossz
 - Bevezethető a hullámszám, $k = 2\pi/\lambda$, ezzel $f = f_0 \sin kx$
- Tetszőleges alakú hullámok: szinuszokra bonthatóak
- E-M hullám:

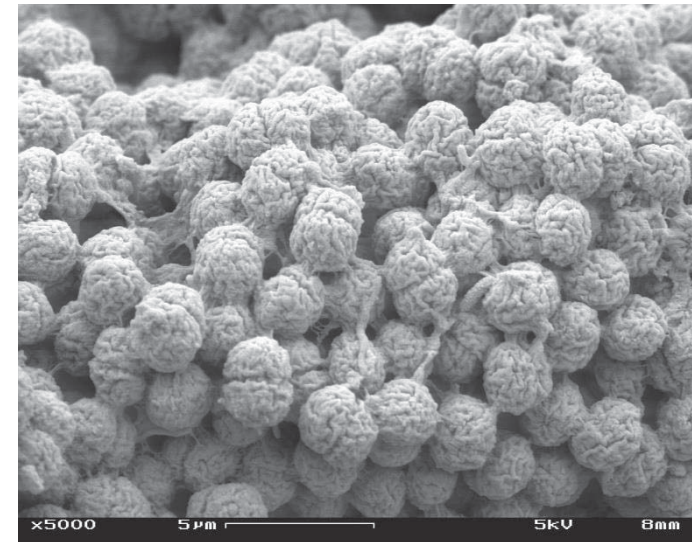
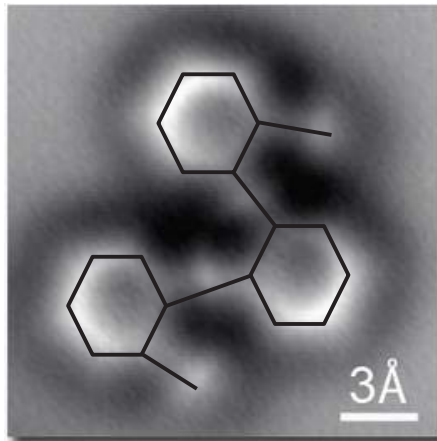


- Intenzitás (felületegységre jutó teljesítmény): $I \propto |E|^2$
- Hullámhossz-spektrum:



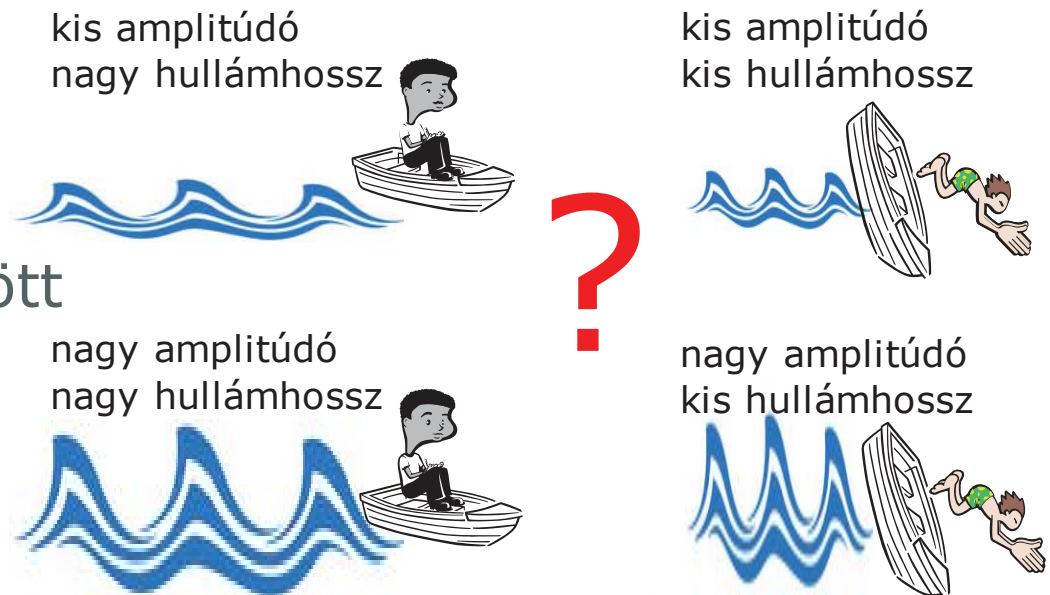
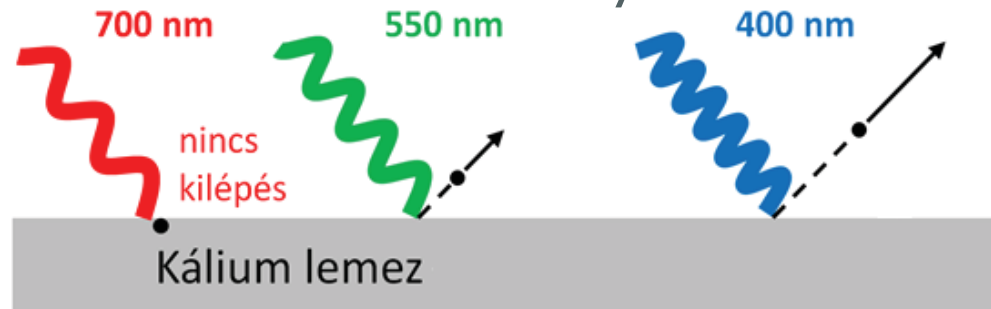
Mikroszkópia és hullámhossz

- Hullám + objektum = interferencia, ha $\lambda \lesssim$ méretskála
- A fény hullámhossza 3-600 nm között van: ennél kisebb tárgyat nem láthatunk vele ($1\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$, mikroszkóp)
- Elektronmikroszkóp: nanoszkóp
 - $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10 \text{ \AA}$ felbontás
 - Biológiai struktúrák felbontása
- Atomok mérete: kb. 10^{-10} m
 - Atomi erő mikroszkóp!
- Atommag:
 $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$
 - Femtoszkóp?



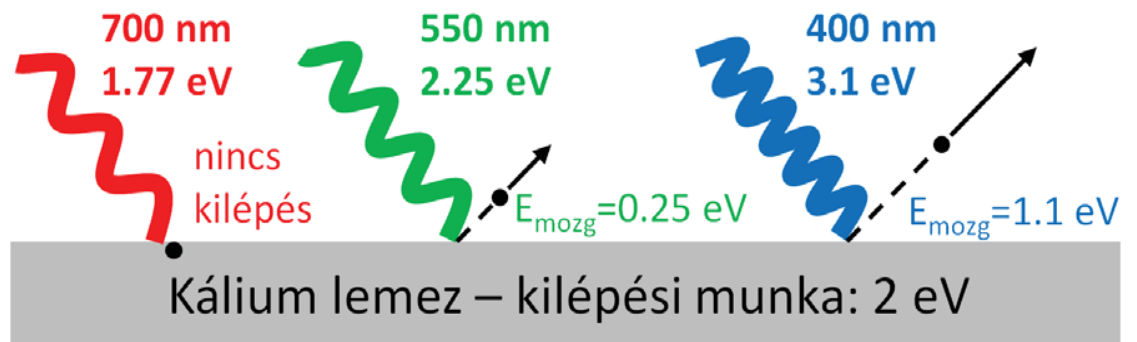
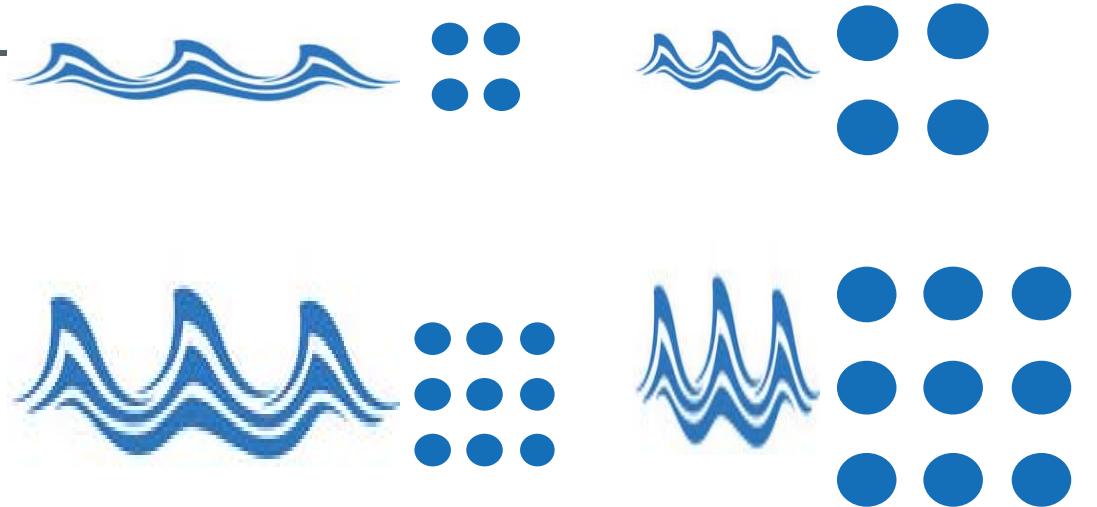
A fény biztosan hullám?

- Hertz, fotoelektromos hatás: fémlemezről fény hatására elektronok lépnek ki
- Hertz tapasztalata: a hullámhossz számít
- Hullám vs. hajó: az amplitúdó számít!
- Hiába nagy a hullám, a hullámhossznak kell kicsinek lenni!
- Nagy hullám: több kilökött elektron!
- Mi lehet ennek magyarázata?



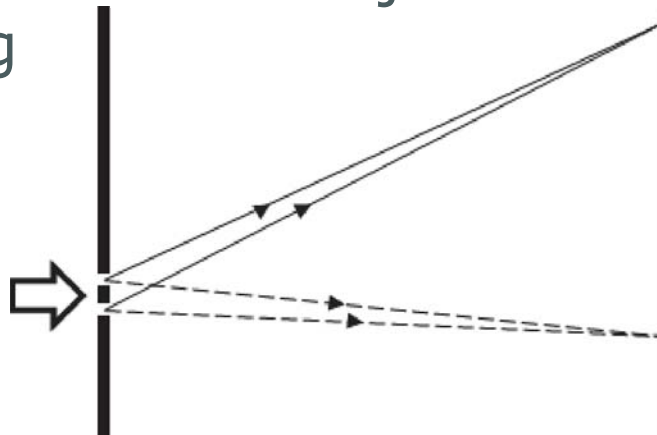
A fény részecsketermészete

- Einstein: a fény energiacsomagokban érkezik!
- Amplitúdó: csomagok SZÁMA
- Hullámhossz: csomagok NAGYSÁGA
- Pontosabban $E = \frac{hc}{\lambda}$, ahol $hc = 1240 \text{ eV}\cdot\text{nm}$
- Kis hullámhossz: nagy energiacsomagok!
- Konkrét megfigyelés: van egy λ_{max} ; ez alatt többletenergia elektront gyorsítja

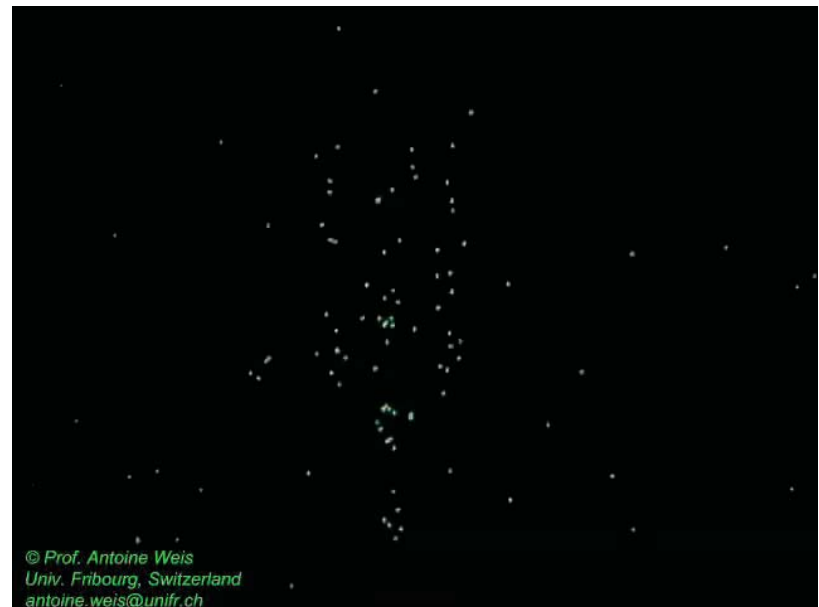


Egyfotonos interferencia

- Mi történik, ha a kétrés-kísérlet forrása nagyon gyenge?
- Egyszerre csak egy foton érkezik résekre
- Ez a legkisebb energiacsomag, nem oszolhat két részre!
- Lesz interferencia?
- Igen, de fokozatosan jelenik csak meg

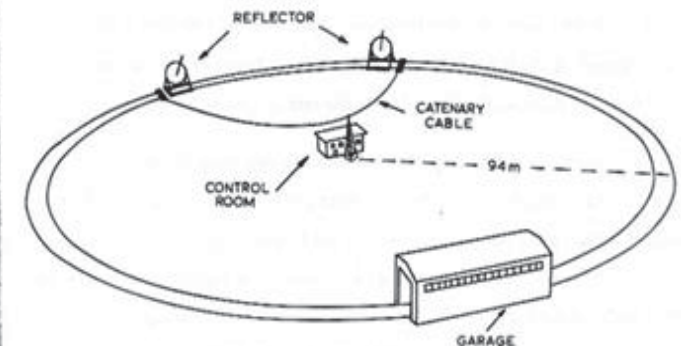
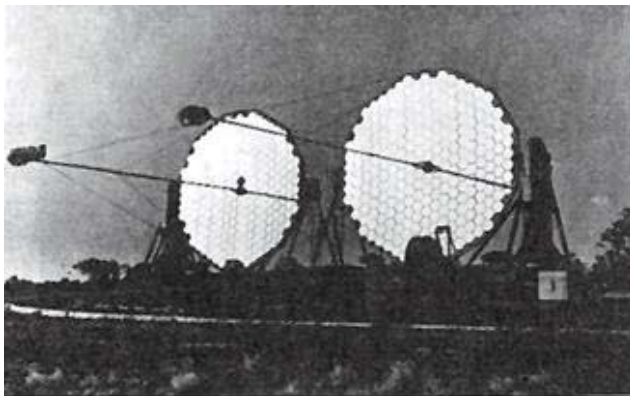


- A foton önmagával interferál?
- A két „lehetőség” interferál önmagával!



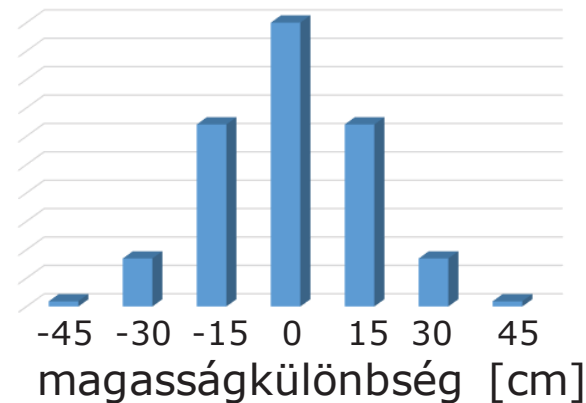
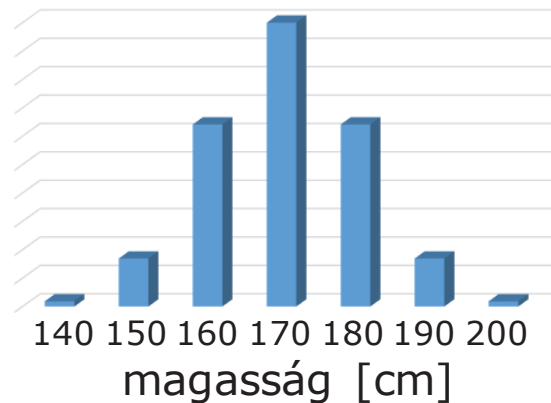
Egy meglepő felfedezés: a HBT-korreláció

- Rádiócsillagászat: Jansky, 1933, furcsa 24 órás oszcilláció; a csillagok is sugároznak a rádióhullámú tartományban!
- R. H. Brown: rádióhullámú távcsővel vizsgálta a Szíriuszt
- R. Q. Twiss matematikust kérte fel a kísérlet háttérének közös kidolgozására
- Furcsa korrelációt talált az eredményekben

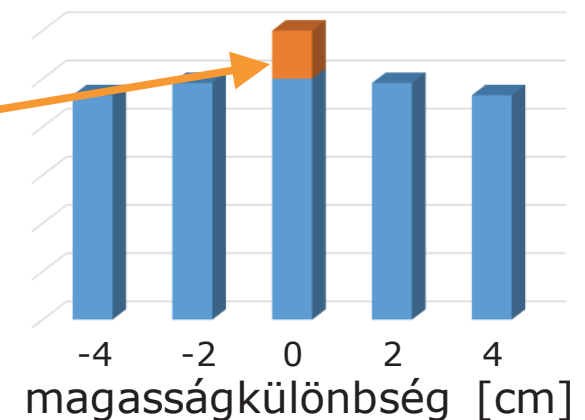


Mit jelent az, hogy korreláció?

- Hallgatóság, magasságok gyakorisága $N(h)$
- Magasságkülönbségek: $N(\Delta h) = \langle N(h)N(h + \Delta h) \rangle$, átlag h -ra

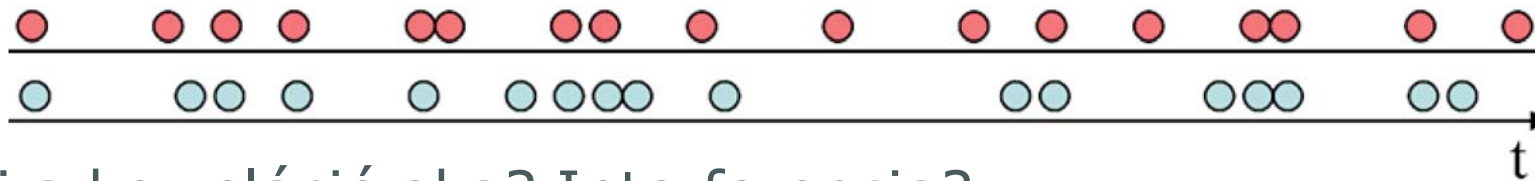


- Kivéve, ha sok az egyetérző ikerpár: váratlanul sok egyforma magasság – **növekedés a nulla pontban!**
- Ekkor $N(0) > \langle N(h)N(h) \rangle$
- Korreláció: elárulja az ikerpárok számát!

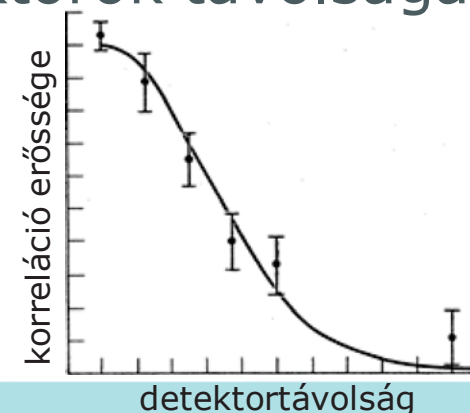
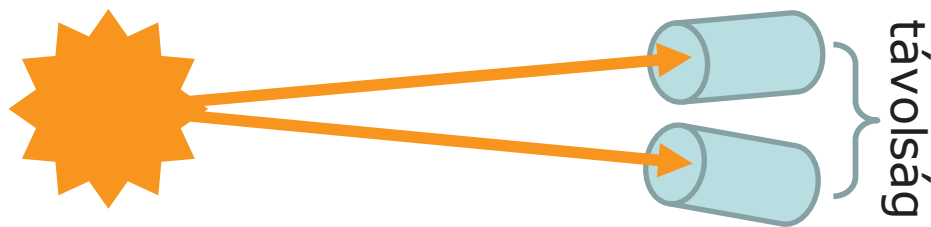


A HBT-korreláció

- R. H. Brown megfigyelése: a két detektor kis távolsága esetén nagy a korreláció a két detektor között
- Együttes intenzitás „túl gyakori”: $I(A, B) > I(A)I(B)$

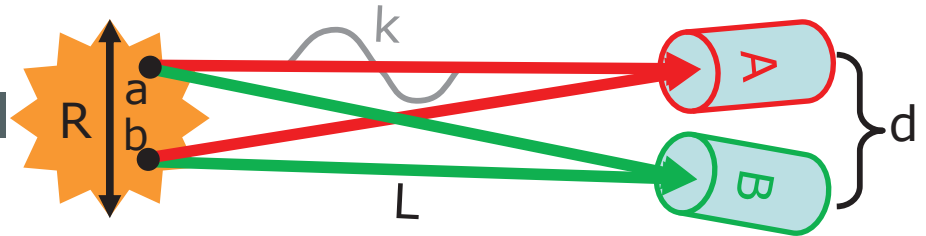


- Mi a korreláció oka? Interferencia?
- „Két különböző foton között sosem lehet interferencia”
P. A. M. Dirac, A kvantummechanika alapjai
- Miért csökken le a korreláció a detektorok távolságával?

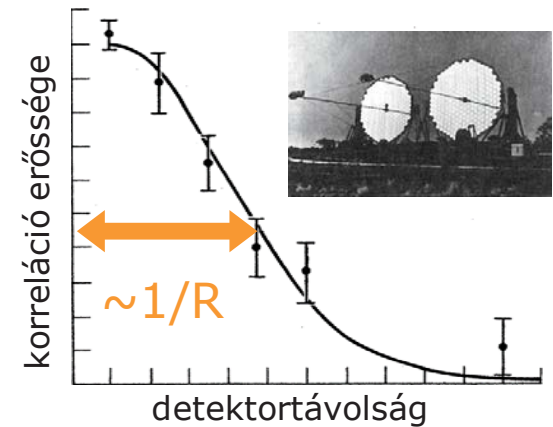


A HBT-effektus klasszikus leírása

- „A’ detektorban az átlagos intenzitás $\langle I_A \rangle$, a és b forrásból
- „B’ detektorban $\langle I_B \rangle$ intenzitás
- A forrás méretétől függően sokféle geometria lehetséges
- Az átlagos együttes intenzitás: $\langle I_A I_B \rangle$
- Mindez nagyon leegyszerűsítő tárgyalás, de kb. működik
- Brown mérése: $\frac{\langle I_A I_B \rangle}{\langle I_A \rangle \langle I_B \rangle} = 1 + \frac{1}{2} \cos(\Delta)$, ahol $\Delta = \frac{kRd}{L}$, ha $d \ll R \ll L$
- A pontszerűnek tűnő forrás (csillag) mérete mérhető: 30 nanoradián
- Nanoszkóp (radiánban)
- De mi van a fotonokkal?



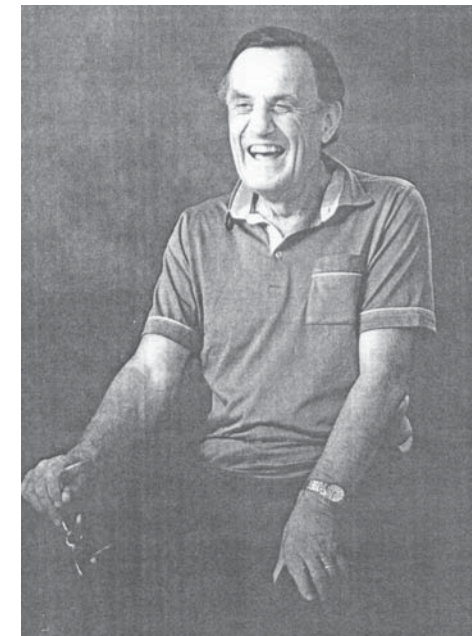
korreláció!



A tudatlanság néha áldás

„Hogy két foton különböző detektorokba való érkezése korrelált lehet: meglepően sokak számára ez eretnek, sőt, nyilvánvalóan abszurd ötlet volt. Félreérthetetlen formában közölték ezt velünk, személyesen, levélben, nyomtatásban; és laborkísérletek publikációján keresztül mutatták meg, *hogyan tévedünk.*”

„Messze voltam attól, hogy ki tudjam számolni, a kísérletünk elég érzékeny lehet-e egy csillag vizsgálatára. Ehhez ismernem kellett volna a fotonokat, és mérnökként fizikai tanulmányaim jóval a kvantummechanika előtt megálltak. Még az is lehet, hogy különben, sok fizikushoz hasonlóan arra jutottam volna, hogy a dolog nem működhet – *a tudatlanság néha áldás* a tudományban.”



Boffin: Személyes történet a radar, a rádiócsillagászat és a kvantumoptika korai időszakából (R. H. Brown)

A tudatlanság néha áldás

„Érdekes megnézni az elektron töltésére vonatkozó, Millikant követő méréseket. Ha az idő függvényében ábrázoljuk ezeket, látjuk, hogy az első kicsit nagyobb Millikan értékénél, a következő még nagyobb, és így tovább, míg egy bizonyos, Millikan értékénél nagyobb számnál meg nem állapodnak. Miért nem mérték egyből helyesen az értéket?

...

Amikor a kísérlet vezetője Millikanénél lényegesen nagyobb számot kapott, azt gondolta, biztos valamit rosszul csinált – és megkereste ennek okát. Ha Millikanhez közeli értéket talált, akkor nem olyan alaposan nézte át a kísérletet.”

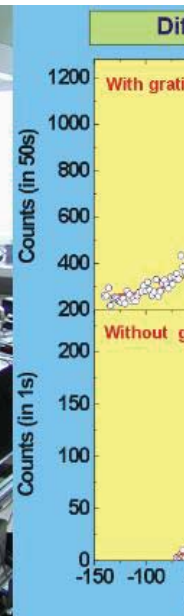
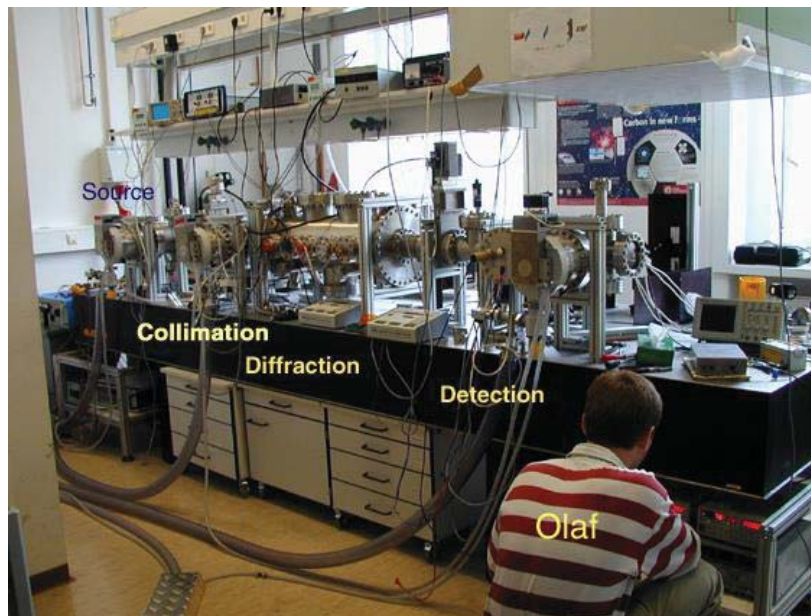
„Tréfál, Feynman úr?” – Egy mindenre kíváncsi pasas kalandjai (R. P. Feynman)

Az eddigiek összegzése

- A fény elektromágneses hullám, intenzitása (erőssége) a hullámzó tér négyzetével arányos
- A fény ugyanakkor fotonokból is áll
- Nem a fotonok interferálnak, hanem a „lehetőségek”, azaz a lehetséges útvonalak
- R. H. Brown megfigyelése: a csillag különböző pontjaiból érkező fény (rádióhullám) interferál
- A fény-távcsőben pontszerű csillag mérete mérhető!
- Ezek különböző fotonok!
- Hogyan lehetséges az interferencia?

A részecskék hullámtermészete

- Ha a fény lehet részecske, akkor az elektron is lehet hullám? Igen, sőt, az atomok, molekulák is!
- Egymolekula-interferencia szerves makromolekulával (ftálocianin-származék)
- Kétrés-kísérlet C_{60} molekulákkal:

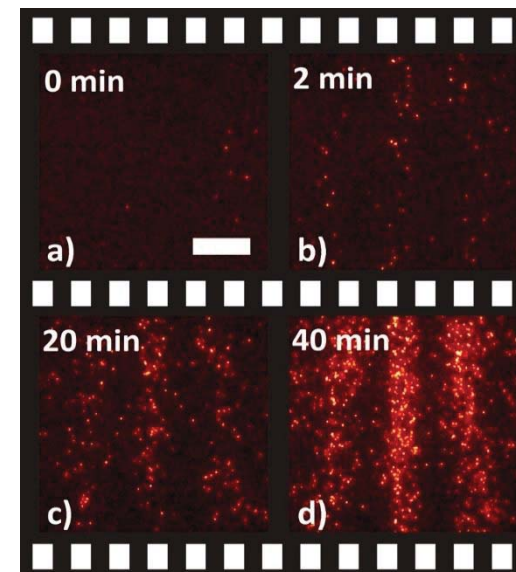


The quantum molecular movie
The wave-particle duality of phthalocyanine

Thomas Juffmann
Adriana Milic
Michael Müllneritsch
Peter Asenbaum
Alexander Tsukernik
Jens Tüxen
Marcel Mayor
Ori Cheshnovsky and
Markus Arndt

A kvantumfizika alapjai

- Mi felel meg a elektromágneses hullám intenzitásának? Észlelési valószínűség, avagy megtalálási valószínűség
- Mi hullámozik? Hát a hullámfüggvény!
A részecske egyúttal $\Psi(x)$ hullám, k hullámszámmal
- Erre $k = p/\hbar$ összefüggés igaz (ahol p az impulzus)
- Így $P(x) = |\Psi(x)|^2$ a részecske „megtalálási valószínűsége”
- Egy részecske bárhova becsapódhat
- Sok részecske már követi a $P(x)$ eloszlást
- Ténylegesen észlelhető is
- Hogy $\Psi(x)$ micsoda? Interpretáció kérdése...



A részecskék megkülönböztethetősége

- Öt golyóból hányféleképpen választhatunk kettőt?



- $\binom{5}{2} = \frac{5!}{2!3!} = 10$ a lehetőségek száma
- Mi van, ha a golyók helyett részecskékről beszélünk?
- Megkülönböztethetetlenek! Csak egy lehetőség!



- Mit jelent mindez számunkra?
- Kétrészecske hullámfüggvény: szimmetrizálandó!

A kvantumstatisztika születése

- S. N. Bose, India, 1922: egyetemi előadása során azt akarta bemutatni, hogy a Planck-féle kvantummechanika ellentmond a megfigyeléseknek
- Egyszerű statisztikai hibát vétett az órán
- Ezzel azonban egyeztek az adatok!
- Bose-féle statisztika? Senki nem hitt neki
- Einstein igen, közös cikkek 1924-ben
- Bose–Einstein-statisztika!
- A fotonok „felcserélhetőek”
- Megtalálási valószínűségük „szimmetrikus”

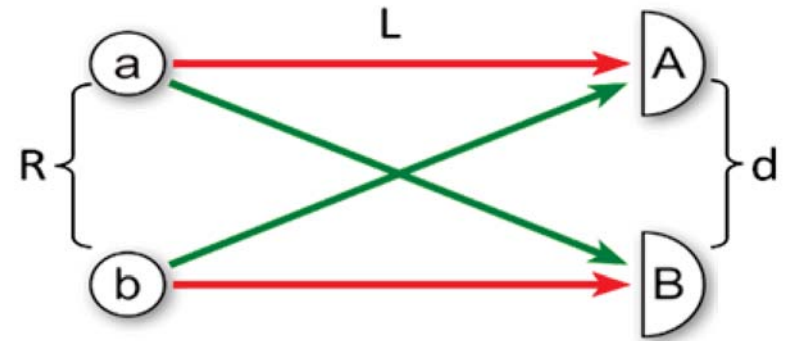


A HBT-effektus kvantumoz magyarázata

- „Szimmetrizált hullámfüggvény”:
mindegy, hogy $a \rightarrow A$ és $b \rightarrow B$
vagy $a \rightarrow B$ és $b \rightarrow A$
- Ezért a fotonok a vártnál
„jobban szeretnek” egy irányba menni
- Konkrétan e^{ikx} alakú hullámfüggvényekből megkapható
a két részecske együttes valószínűsége a két detektorban:

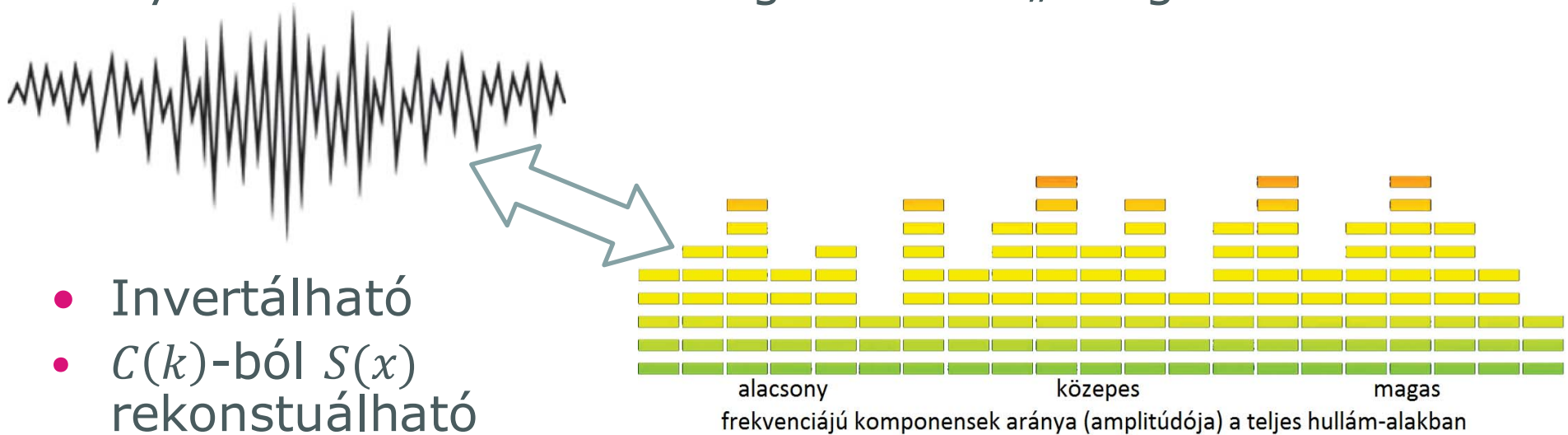
$$P(A,B) = 1 + \cos k \frac{Rd}{L}$$

- Az eredmény ugyanaz, mint a klasszikus esetben
- A korreláció szélessége a forrás méretével ford. arányos
- Bose–Einstein-korreláció!



Bose–Einstein-korreláció, kiterjedt források

- Az előző leírás két forrás esetén érvényes
- Kiterjedt, $S(x)$ eloszlású forrás esetén mi történik?
- Korreláció a beérkező részecskék impulzusai között
- Az eredmény: $C(k) = 1 + |\tilde{S}(k)|^2$, ahol $\tilde{S}(q) = \int S(x) \cos kx$, másképpen a Fourier-komponensekre bontás
- Ilyet hol láttunk már? Hanghullám és „hangszíne”

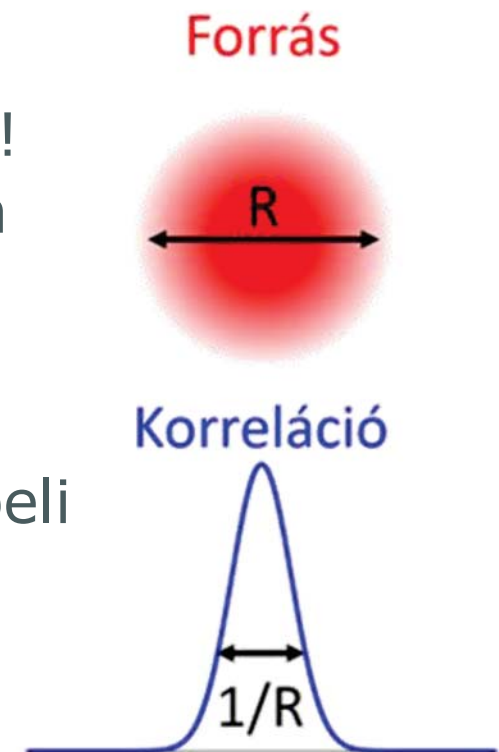


Bose–Einstein-korrelációk és femtoszkópia

- HBT-jelenség: forrás alakja \Leftrightarrow korrelációs függvény

$$C(k) = 1 + |\tilde{S}(k)|^2$$

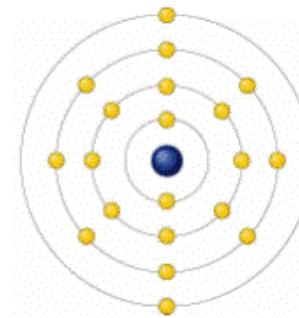
- Fourier-transzformált és eredeti függvény: egyértelmű kapcsolat!
- A korreláció elárulja a forrás térbeli alakját!
- Egyfajta „mikroszkópként” működik, hiszen térbeli alak rekonstruálható
- Akármilyen mérettartományban: teraszkép, ..., femtoszkóp
- Sőt, időben változó források esetén az időbeli struktúra is kideríthető!
- Nagyon gyors változások észlelhetőek



Mi a helyzet más részecskékkel?

- Pauli, 1924: a periódusos rendszer megmagyarázható, ha minden pályán csak egy elektron lehet, és a pályákat négy kvantumszám írja le

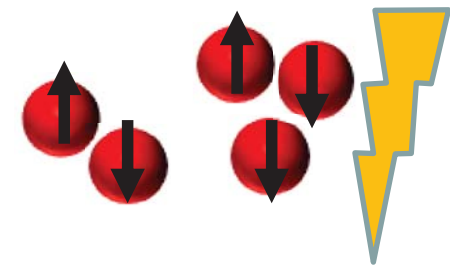
- N (energia)
- L (pályaperdület nagysága)
- M (pályaperdület iránya)
- S (spin)



CALCIUM 20e⁻

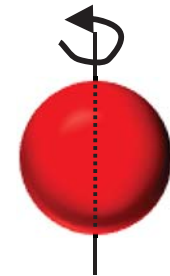
N=1, L=0 (1s): 2db
N=2, L=0 (2s): 2db
N=2, L=1 (2p): 6db
N=3, L=0 (3s): 2db
N=3, L=1 (3p): 6db
N=4, L=1 (4s): 2db

- Mi a helyzet az elektronok statisztikájával?
- Két elektron nem lehet azonos állapotban!
- További probléma a fémek fajhőjével: elektronok hozzájárulása nem stimmel!
- Fermi–Dirac-statisztika, 1926
- Elektronok szeretnek különbözőek lenni!



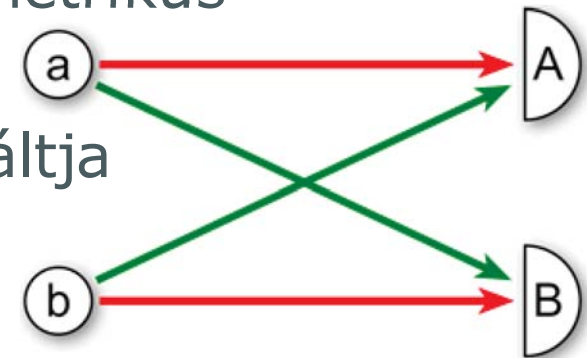
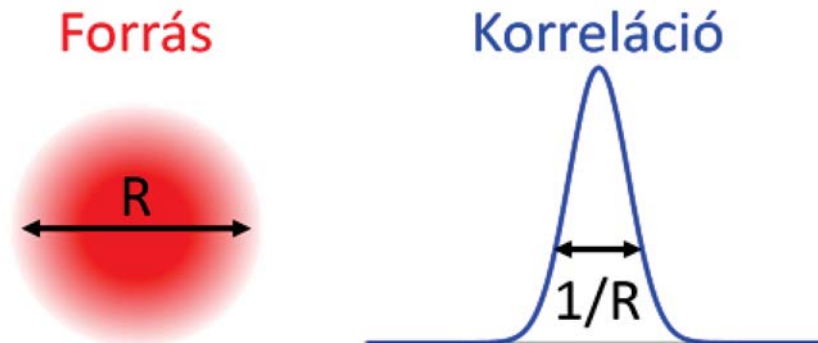
A részecskék osztályozása

- A részecskéknek van sajátperdülete, spinje!
- Ez is kvantált, $\hbar/2$ egész számú többszöröse lehet
- Bozonok: $0, \hbar, 2\hbar$, fermionok: $\frac{\hbar}{2}, \frac{3\hbar}{2}, \frac{5\hbar}{2}$
- Az elemi fermionok alkotják az anyagot: elektron, kvarkok
- Az elemi bozonok közvetítik a kölcsönhatást: foton, gluon
- Összetett részecskék: bármelyik lehet
 - Barionok (proton, neutron): három kvark, fermion!
 - Mezonok (pl. pion): két kvark, bozon!
 - ^4He : bozon
 - ^3He : fermion
- Lásd még pl. szuperfolyékonyság, [Sasvári L., 2012. 3. 1.](#)
- Bozonok: Bose–Einstein-korreláció
- Fermionok: Fermi–Dirac-antikorreláció



Az eddigiek összegzése

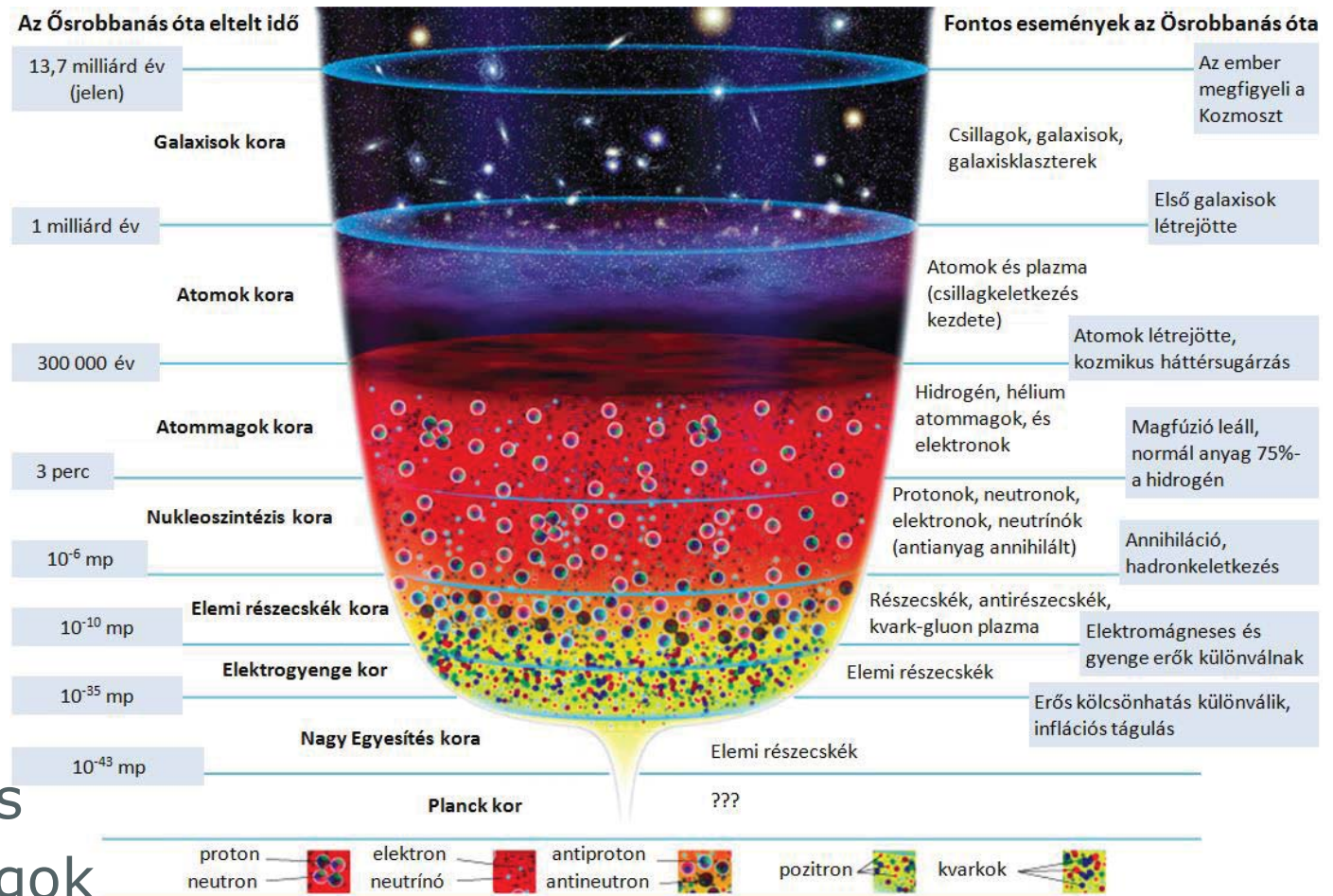
- Mindennek van részecske- és hullámtulajdonsága
- A kvantumfizikában a fotonok megkülönböztethetetlenek
- Emiatt két foton hullámfüggvénye szimmetrikus
- Ebből adódik a Bose–Einstein-korreláció
- A korreláció a forrás Fourier-transzformáltja
- A forrás alakja vizsgálható!



- Bozonok: Bose–Einstein-korreláció
- Fermionok: Fermi–Dirac-antikorreláció

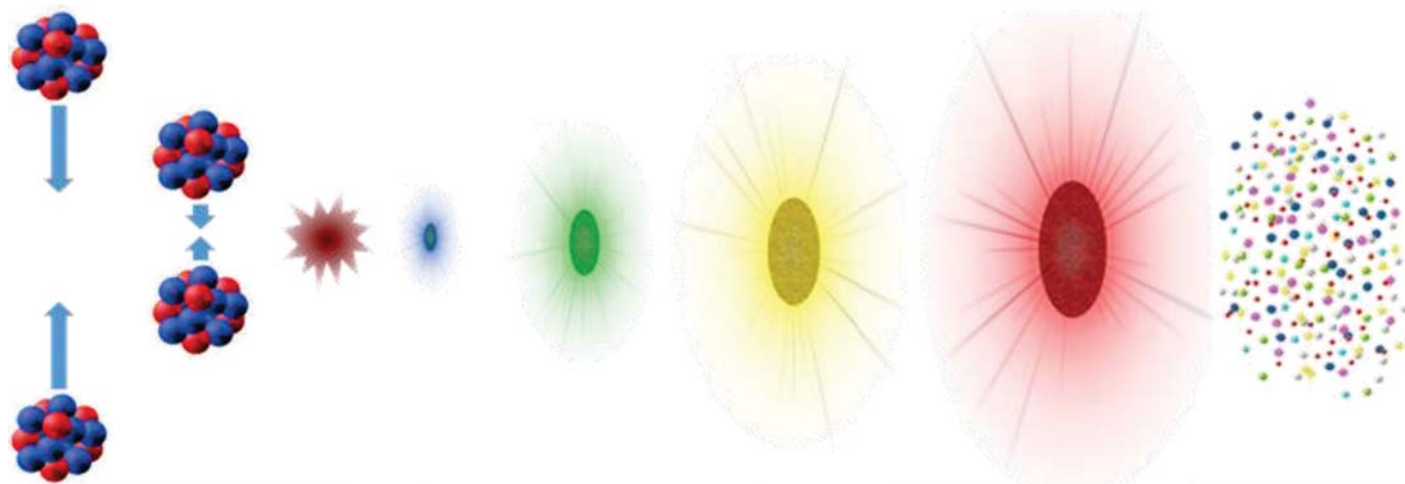
Ősrobbanás a laborban

- Az Univerzum korszakai:
 - Csillagok
 - Atomok
 - Atommagok
 - Nukleonok
 - Elemi részek
 - ...?
- Hogyan vizsgáljuk?
- Mini ősröbbanás
- Nehéz atommagok nagyenergiás ütközése

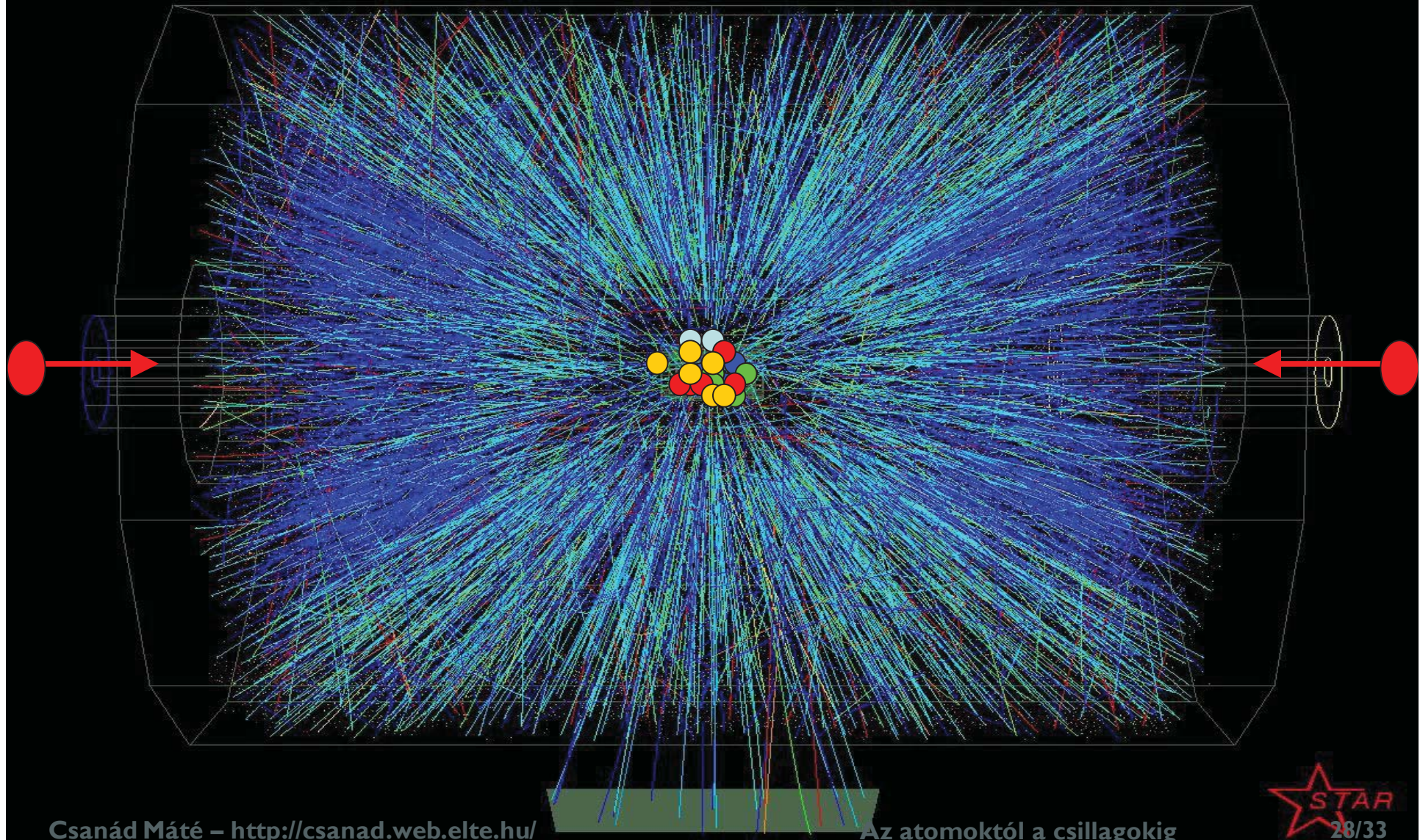


Nehéz magok nagyenergiás ütközései

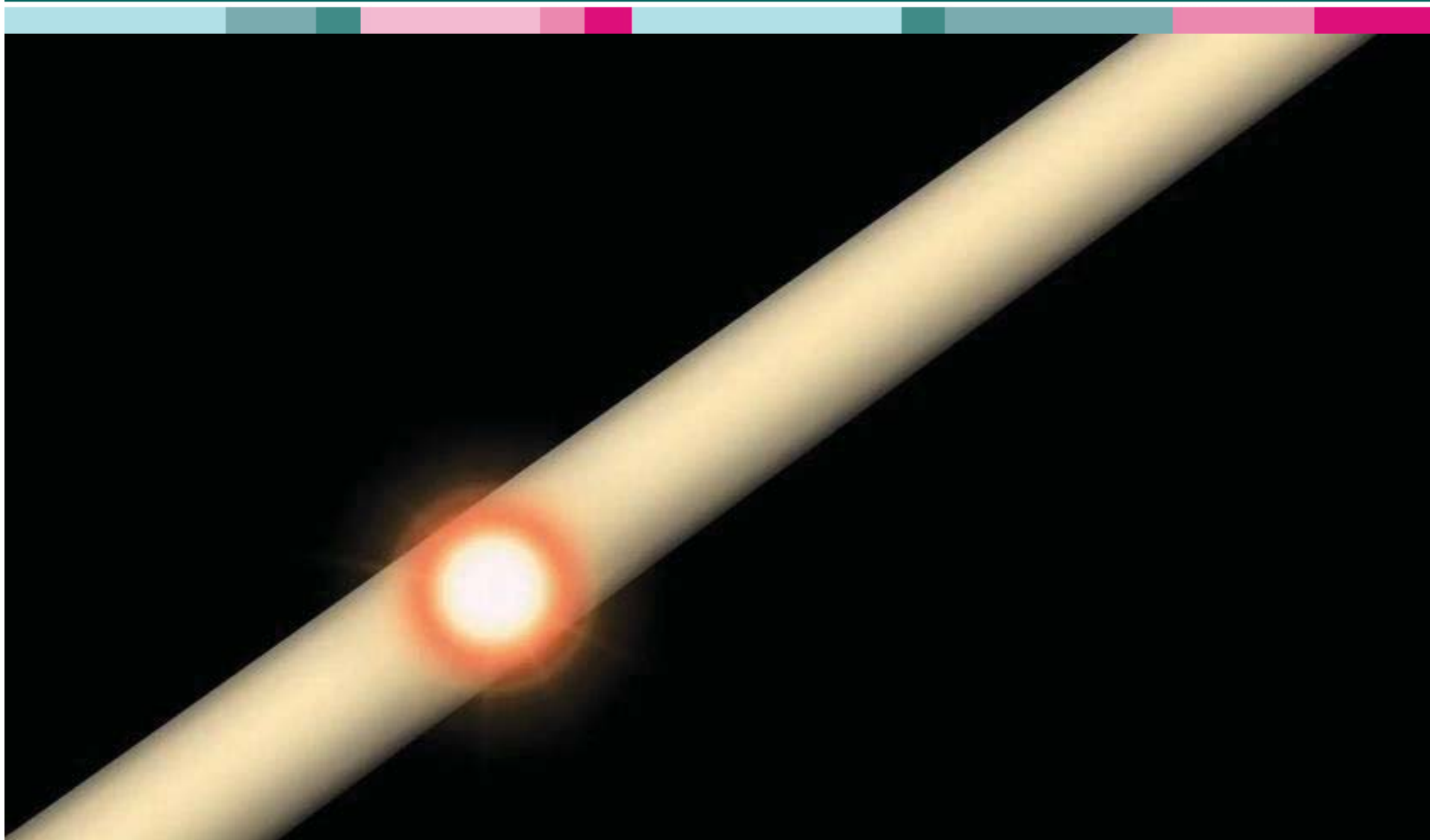
- Kezdetben extrém magas hőmérséklet, $5 \cdot 10^{12}$ Kelvin!
- Protonok, neutronok megolvadnak, Ősrobbanás utáni állapot jöhet újra létre
- Kvarkanyag kiszabadul, kvark-gluon-plazma formájában
 - Lásd, [CsM, Atomcsill, 2010. dec. 16.](#)
- Ahogy lehűl, megfagy, igen rövid idő alatt
- A „megfagyott” részecskéket észleljük



Mit észlelünk mindebből?

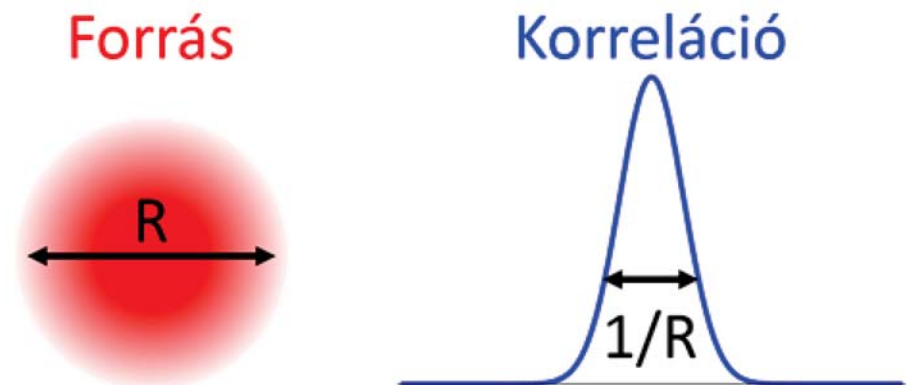


A gyorsítástól az ütközésig



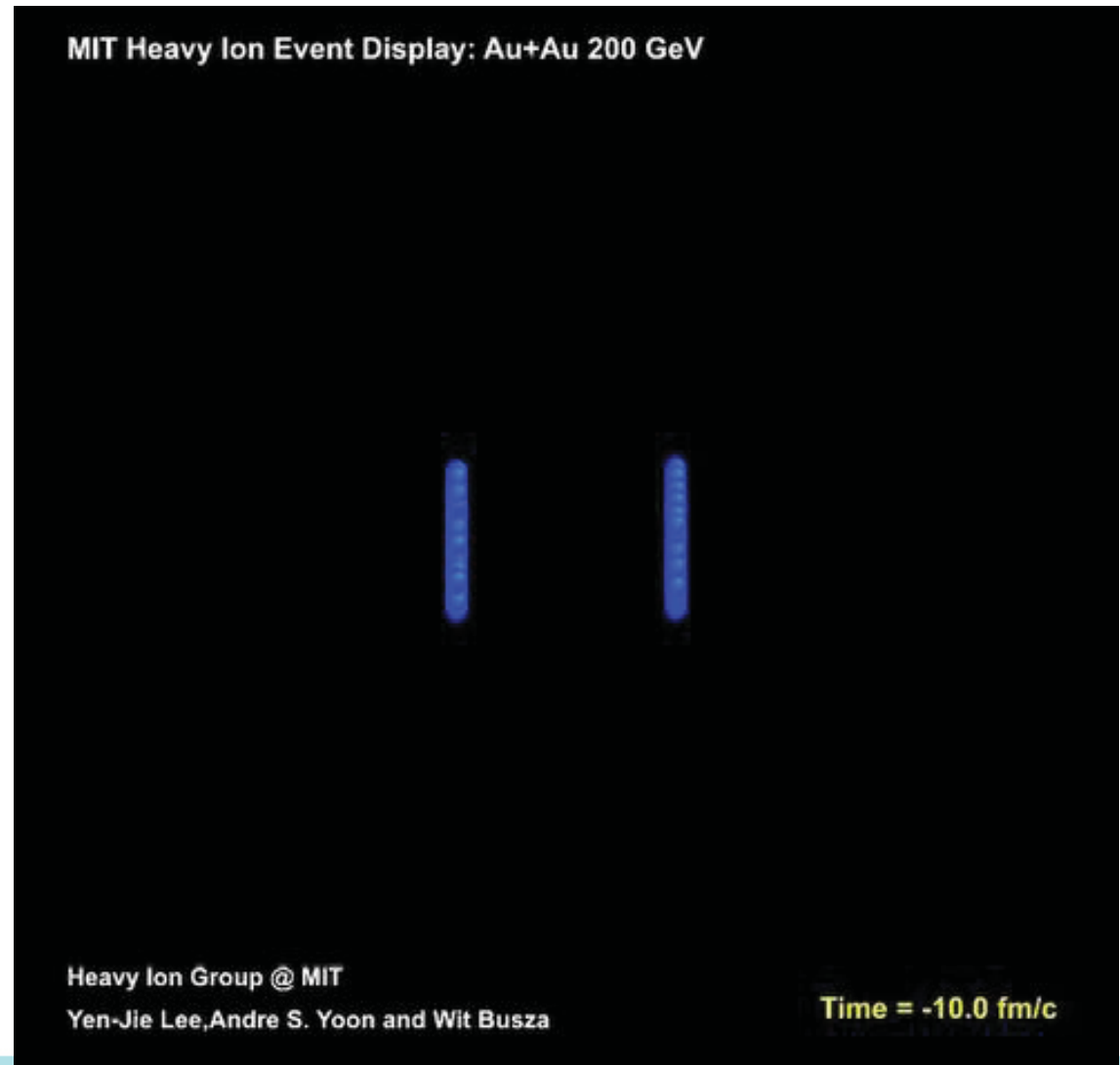
Femtoszkópia a nagyenergiás fizikában

- Nagyenergiás fizika egyik fő célja: a hatalmas részecskegyorsítóknál létrehozott mini ősrobbanásban keletkező anyag megismerése
- Hogyan férhetünk hozzá a keletkező anyag térbeli és időbeli struktúrájához, ha ilyen gyorsan „megfagy”?
- A kifagyott bozonok (pionok) HBT-korrelációi segítségével!
- Pionkeltés térbeli eloszlása: korrelációs függvényből hozzáférhető
- Időbeli eloszlás is vizsgálható
- HBT-korreláció analízise:
 - Méret a kifagyáskor kb. 10^{-14} m, azaz 10 fm (atommag mérete)
 - Élettartam kb. 10^{-22} mp = 10 fm/c (kifagyás < 1 fm/c alatt) ennyi idő alatt megy át a fény egy atommagon!



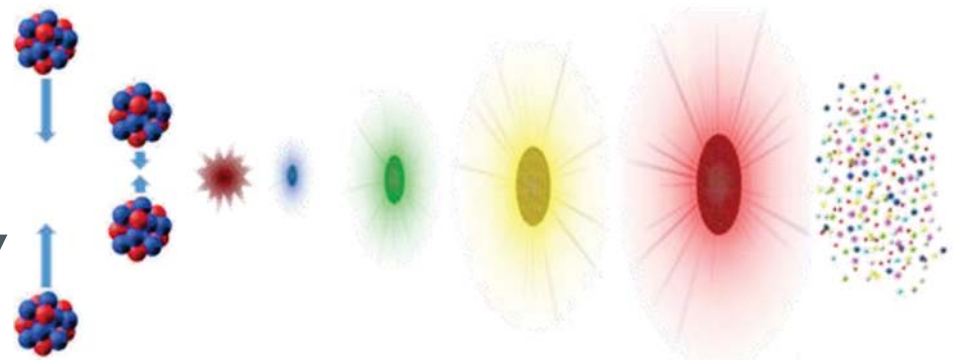
Egy nehézion-ütközés leírása

- Ütköző atommagok:
Lorentz-kontrahált
„palacsinták”
- Kb. 6 fm/c idő után
kifagyás
- Kihűlés lassabb
a szélén
- Részletes megértés:
HBT effektus
alapján!
- Tovább szükséges
fizika: relativitás
ld. [DGy, 2009.01.15.](#)

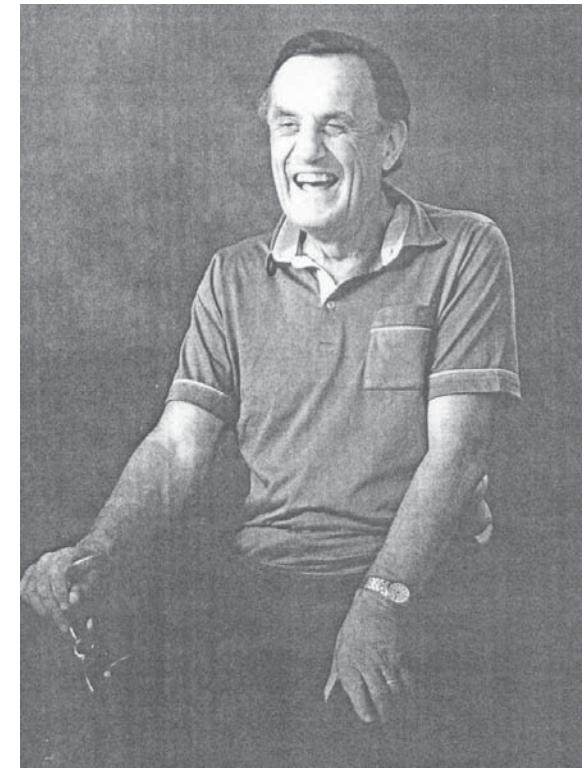
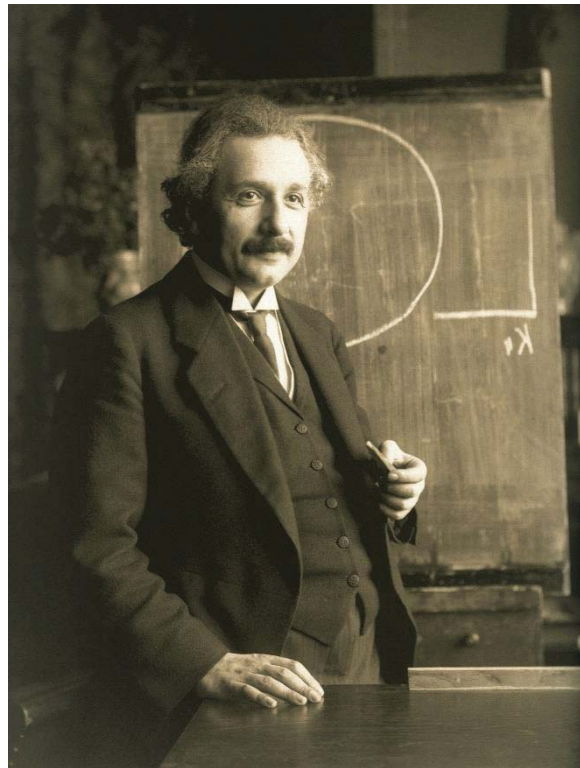


Összegzés

- Brown és Twiss: interferenciajelenség
- Bose és Einstein: kvantumstatisztika
- HBT effektus: bozonok szimmetriája miatt korreláció
 - Fermionok: Fermi–Dirac-statisztika, antikorreláció
- Korreláció \Leftrightarrow forrás alakja; femtoszkópia
- Mini ősrobbanás feltérképezhető
 - 10^{-14} méter méret
 - 10^{-22} mp élettartam
 - 10^{-23} mp „kifagyási idő”

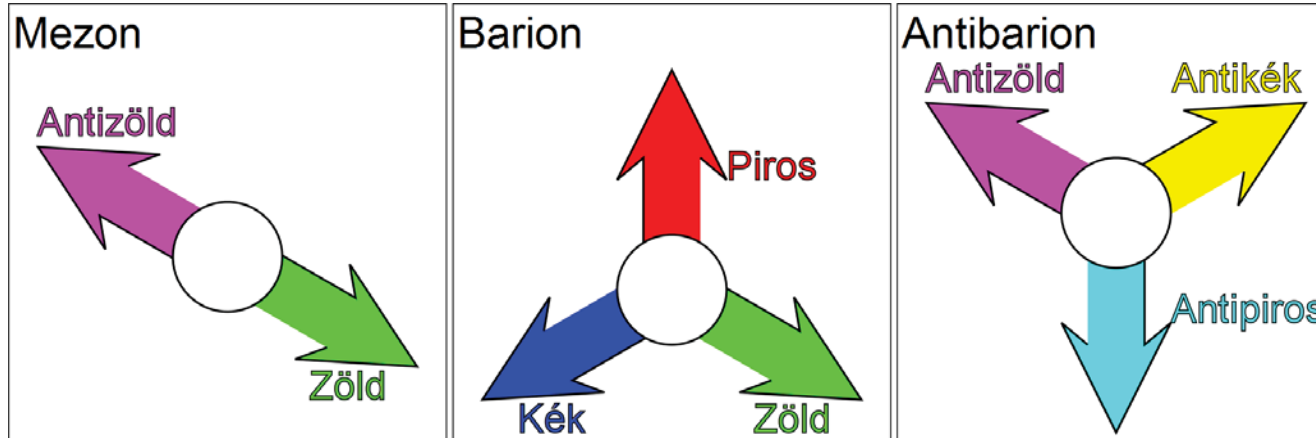


Köszönjük a figyelmet!



Az atommag szerkezete

- Protonokat, neutronokat összekötő erő: erős kölcsönhatás
- Építőkövek: kvarkok
- Erő közvetítője: gluon (elektromosság: foton)
- Elektromos kölcsönhatás: elektromos töltés (+, -)
- Erős kölcsönhatás: színtöltés
 - piros, zöld és kék ill. magenta, cián és sárga



- Megfigyelhető mezonok és barionok: színsemlegesek („fehérek”)
- Kvarkok megfigyelhetőek mezonokon v. barionokon kívül

Körkörös polarizáció és komplex számok

- Itt az elektromos és a mágneses tér „forog”:
 $\vec{E} = (E_x, E_y) = E_0(\cos kz, \sin kz)$
- Egyszerűbb matematikai leírás?
- „Kétdimenziós számok”?
- Komplex számok: $z = (x, y)$
- Szorzási szabály: $z = x + iy$, ahol $i^2 = -1$
- Ekkor pl. $(2 + 3i) \cdot (1 - i) = 2 - 3 + (3 - 2)i = -1 + i$
- Mely számok „nagysága” 1?
 $x^2 + y^2 = 1$, azaz egy kör mentén helyezkednek el
- Másképp: $e^{i\alpha} = \cos \alpha + i \sin \alpha$
- Fenti hullámalak: $E_0 e^{ikz}$; ez a szokásos síkhullám felírása

