

Tartalom

A nagyon kis dolgok, a különféle fizikai részecskék viselkedésének legfontosabb jelenségei.

Megjegyzés

Ez egy viszonylag hosszú és nagyon elvont téma, a lehetőségekhez képest szemléletesen elmagyarázva. Érdekes benne, hogy a világ a legkisebb méreteken mennyire különbözik attól, amihez hozzá vagyunk szokva. (Bár sokat gondolkodtam rajta, szép számmal vannak még benne számomra nyitott vagy megerősítést igénylő kérdések. Ha tudsz bennük segíteni, megköszönöm. A legfontosabb kérdéseket a téma végén egy külön pontba gyűjtöttem össze.)

Kvantum világ

(Azonosító: 024; Változat: 01)

Pozíció a műben

Előszó

A világ működése

Bevezetés

Elvek

Alapok

Megismerés

Véletlenszerűség és rendezettség

Metafizika

A világ építőkövei

Anyag, energia, erők

Idő és tér

Relativitáselmélet

Kvantum világ

Érdekes fizikai jelenségek

A világ mélységei

Elvarratlan szálak

Élet

Elme

Ember

Társadalom

Egység

Program

Az ember élete

1. A kvantumvilág jelentése és különössége	2	—
2. A „részecskék” valódi természete	3	
2.1. Szétkenődés	3	1
2.2. Összeomlás	4	
2.3. A „részecskék” hullámtermészete	5	—
3. A kétréses kísérlet.....	7	
4. Az energia kvantumai	9	2
5. A határozatlansági elv.....	10	
6. Összefonódás.....	11	—
7. Furcsa kapcsolatok.....	12	
8. Egyebek	13	
9. Alkalmazások	14	3
10. Kérdések @@.....	14	
Referenciák.....	16	—

1. A kvantumvilág jelentése és különössége

Ehhez a témához érdemes előbb áttekinteni az ‘Anyag, energia, erők’ témát, ami az említett jelenségek alapjait mutatja be.

A kvantumjelenségek a nagyon kicsi dolgoknál jelennek meg.

(Ellentétben a relativitáselmélet jelenségeivel, melyek a gyorsan mozgó és nagy tömegű dolgoknál jelentősek.)

Emberi méretekben a kvantum jelenségek gyakorlatilag **nem tapasztalhatóak**, ezért is tartott olyan sokáig, hogy feltűnjenek. Ami pedig különösségüket illeti, az semmiben sem marad el a relativitáselmélet jelenségeitől.

A **kvantum szó** valaminek egy adott (legkisebb) mennyiségét jelenti.

A világ sokáig folytonosnak tűnt az ember számára, vagyis olyannak, amiben nincs a dolgoknak legkisebb egysége, ahol akármilyen kicsi is valami, azt még tovább lehet osztani.

Először az **anyaggal** kapcsolatban merült fel, hogy az esetleg nagyon kicsi, oszthatatlan részecskékből, atomokból áll. Az ötlet már az ókorban felbukkant, de az újkorig kellett várni, amíg azt tudományosan is meg tudták erősíteni. Kisvártatva viszont az is kiderült, hogy az atom, amiket addig a legkisebb egységnek gondoltak, még tovább osztható.

Ez idáig nem is volt meglepő, hiszen gyakran az emberi világban is hasonló egységekből építkezünk, például ahogyan egy házat is téglákból rakunk össze. A meglepőbb az volt, hogy az **energia** is csomagokban, részecskék által közvetítve terjed, amit a XX. század első felében fedezték fel. Az ebből kiinduló kutatások aztán alapvetően átformálták a mikrovilágról alkotott képünket.

2. A „részecskék” valódi természete

Ebben a témában, amikor a **részecske** szót **idézőjelbe teszem**, akkor a kvantumjelenségek kapcsán újonnan felfedezett, mind anyagi, mind hullámtermészetet mutató, szétkenődésre képes dologra gondolok. Amikor **idézőjel nélkül** használom, akkor a hagyományos, megtestesült, anyagi darabkát értem alatta.

Az itt leírt jelenségeket szemlélteti fogja a következő pontban bemutatott kétrészes kísérlet.

2.1. Szétkenődés

Mint kiderült, az elemi **„részecskék”** nem olyan szilárd darabkák, kis golyócskák, amilyenek az emberi világban szerzett tapasztalataink révén elképzelnénk őket. Ehelyett ugyanis, ameddig magukra vannak hagyva, szétkenődnek, azaz bizonyos értelemben **egyszerre kerülnek minden megengedett állapotukba.**

Miközben ráadásul hullámként viselkednek, lásd alább. Az, hogy bizonyos értelemben, itt annyit tesz, hogy nem az történik, hogy például a részecske a maga hagyományos mivoltában mindenhol ott van, ahol elvileg lehet, ehelyett mintegy **az összes lehetőséget végigpásztázza**, melyek közül aztán majd csak egy áll be.

Például ha egy atom kibocsát egy fotont, azt nem egy meghatározott irányba teszi, így a foton „részecske” a fenti értelemben egy adott pillanatban egyszerre van az atom körüli megfelelő sugarú gömb teljes felszínén β . (@@ Jó ez a példa?) És itt **nem csak arról van**

szó, hogy mi nem tudjuk, hol van a részecske, hanem annak szétkenődött alakja valóban egyszerre van az összes lehetséges helyen. (Ezt onnan tudjuk, hogy a „részecske” képes interferálni önmagával, ahogyan az alább el lesz magyarázva.) A szétkenődés azonban nemcsak a „részecskék” térbeli helyzetét érinti, annak **egyéb tulajdonságai is** hasonlóan egyszerre többfélévé válhatnak, így például az energiája vagy a perdülete (spinje) is.

Szétkenődött „részecskéket” közvetlenül nem lehet megfigyelni, mivel az erre használt műszerek is a környezet részét képezik, így definíció szerint kiváltják az összeomlást (lásd alább). „Látni” csak a hagyományos részecskéket látunk tehát, és ezekből, abból, amit az összeomlás után tapasztalunk, tudunk csak következtetni arra, hogy mi történik szétkenődött állapotban. Ez azonban koránt sem ad teljes képet: **nem is tudjuk, mi zajlik valójában**.

Amit tudni lehet a szétkenődött állapotokról, az úgynevezett **hullámfüggvény** írja le matematikailag.

2.2. Összeomlás

A szétkenődöttség megszűnését, amikor a „részecske” hagyományos részecskévé válik, összeomlásnak nevezzük.

Pontosabban a hullámfüggvény összeomlásának. Ilyen **például**, amikor a foton, melynek szétkenődött alakja a gömb felületén egyszerre mindenhol van, hirtelen hagyományos formában megjelenik egy adott helyen, a többiről pedig eltűnik.

A szétkenődött állapot addig tart, ameddig a „részecske” különféle állapotainak nem lehetnek (széles körű) következményei, ameddig a környezetnek mindegy, hogy mi van a „részecskével”, más szóval, amíg a környezetnek nincs információja róla. Ez rendszerint azt jelenti, hogy ha valamelyik megengedett állapotában a részecske kölcsönhatásba léphetne a környezettel, akkor hirtelen eldönti, hogy melyik állapotában van.

Az, hogy adott pillanatban a részecskének milyen **megengedett állapotai** vannak, melyekbe az összeomlással kiléphet, **szigorúan meg van határozva**. Például az atom által kibocsátott foton adott idő elteltével csak az atomtól bizonyos távolságra, azaz egy gömb felületén jelenhet meg β . (E gömb sugara a fény sebességével növekszik, hiszen a foton a fény részecskéje β .) **Egyúttal az is szigorúan meghatározott, hogy az egyes megengedett állapotok beálltának mekkora a valószínűsége**. Ebben a példában a gömb felületének minden pontja egyformán valószínű β . (@@Korrekt ez a gömbös példa?)

Maga a meghatározott állapotok közötti, meghatározott valószínűséggel történő választás viszont a jelek szerint teljesen, **elemi módon véletlenszerű**, azaz egyáltalán nincs oka neki, hogy melyik állapot áll be végül. (Ezáltal egyúttal a választás nem is determinisztikus.) Ez az egyetlen ilyen jellegű dolog a fizika világában. Lásd a ‘Véletlenszerűség’ témában a véletlenszerűség fajtáit. A választás és a kiválasztott állapot beállása pedig **pillanatszerű** β .

Fontos, hogy attól még, hogy valamelyik hagyományos állapotában kölcsönhatásba léphetne a „részecske” valami mással, és ez kiváltja az összeomlást, nem biztos, hogy a szóban forgó állapotában találja magát – így **lehet, hogy a kölcsönhatás megvalósulására nem is kerül sor**. Például ha egy szétkenődött elektron két helyen lehet, és az egyik helyet megvizsgáljuk, és úgy találjuk, hogy ott nincs, az elektron ekkor is összeomlik, és hagyományos részecskéként megjelenik a másik helyen, ahol viszont semmivel nem kerül kapcsolatba.

Bár az összeomlás maga pillanatszerű, hozzá fokozatosan közelít a „részecske”, ahogyan mind több dolgot befolyásolhat, ahogyan a tulajdonságait jellemző információ szétáramlik a környezetbe. Például, ahogy látni fogjuk, attól még hogy egy „részecske” kapcsolatba kerül egy darab másikkal, még nem fog összeomlani, hanem ketten együtt egy **kombinált szétkenődött rendszert** fognak alkotni, összefonódnak. Ahogyan azonban a „részecskénk” mind több dologgal kerül kapcsolatba, ahogyan a kombinált rendszer **mind bonyolultabbá válik, a szétkenődöttség egyre kevésbé képes fennmaradni, így egyszer csak**

megtörténik az összeomlás, ami a teljes összefonódott rendszert hagyományos állapotba helyezi. β

A környezettel való kapcsolatba kerülés lehet indirekt is: lehet, hogy az eredeti „részecske” nem is kerül kapcsolatba mással, mint egy másik „részecskével”. Innentől kezdve viszont elég, ha az utóbbi keveredik tovább a környezettel, mivel most már egy rendszert alkotnak. Az összeomláshoz vezető utat dekoherenciának nevezik. β

Az összeomlással kapcsolatban talán a legfurcsább az, hogy ha a környezet adott pillanatban kapcsolatba kerül a „részecskével”, az akár **visszamenőlegesen is megszüntetheti**, vagy eleve kizárhatja a **szétkenődést**. Ilyen akkor történik, ha vissza lehet következtetni a részecske múltbéli tulajdonságaira: ha utólag bármiképpen meg lehet mondani, hogy a részecskének a múltban milyen tulajdonságai voltak, akkor csak olyan következményeket fog produkálni, melyek megfelelnek ezeknek a határozott tulajdonságoknak. Lásd az alább bemutatott kétréses kísérletben, amikor csak utólag döntik el, hogy bekapcsolják-e a detektort.

(@@ Lásd alább a kérdések között az összeomlásra vonatkozókat.)

2.3. A „részecskék” hullámtermészete

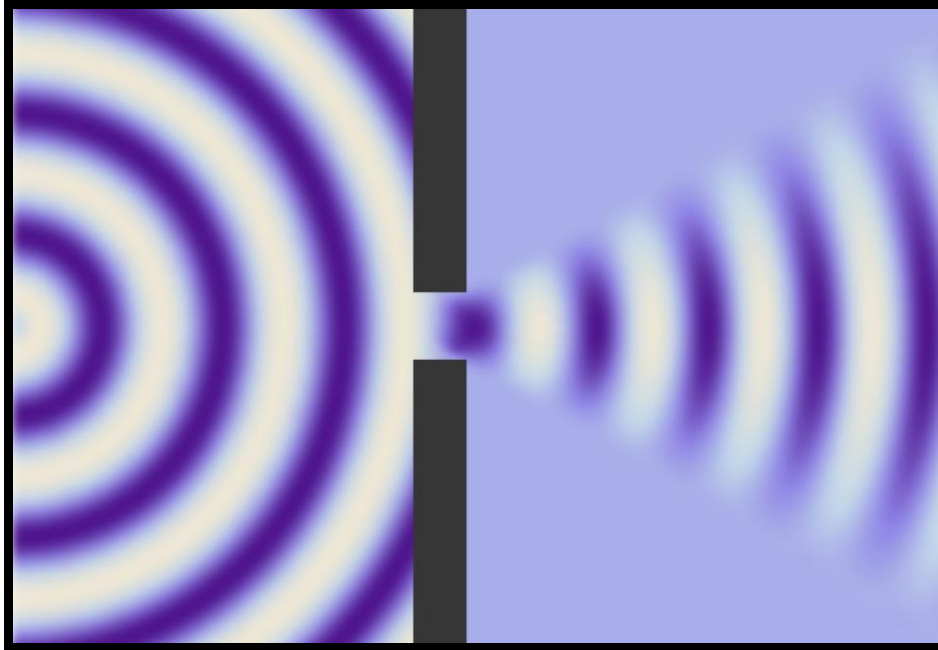
Mind az erőket közvetítő, mind az anyagi „részecskék” hullámszerű jelenségeket mutatnak.

Láttuk, hogy a részecsketermészet, a csomagokban való terjedés az energia illetve az erőket közvetítő részecskék esetén volt **nagyobb meglepetés**. A hullámtermészet ugyanakkor **az anyag „részecskéi” esetén** az, melyeket régebben apró, szilárd darabkákként, kis golyókként képzeltek el.

A **hullámok** maguk itt **láthatatlanok**. Abban **nyilvánulnak meg**, hogy az összeomló részecskék hol milyen valószínűséggel jelenhetnek meg, illetve abban, hogy ez a térbeli eloszlás hullámokra jellemző jelenségeket mutat. Ilyenek a következők.

- **Hullámelhajlás (diffrakció)**

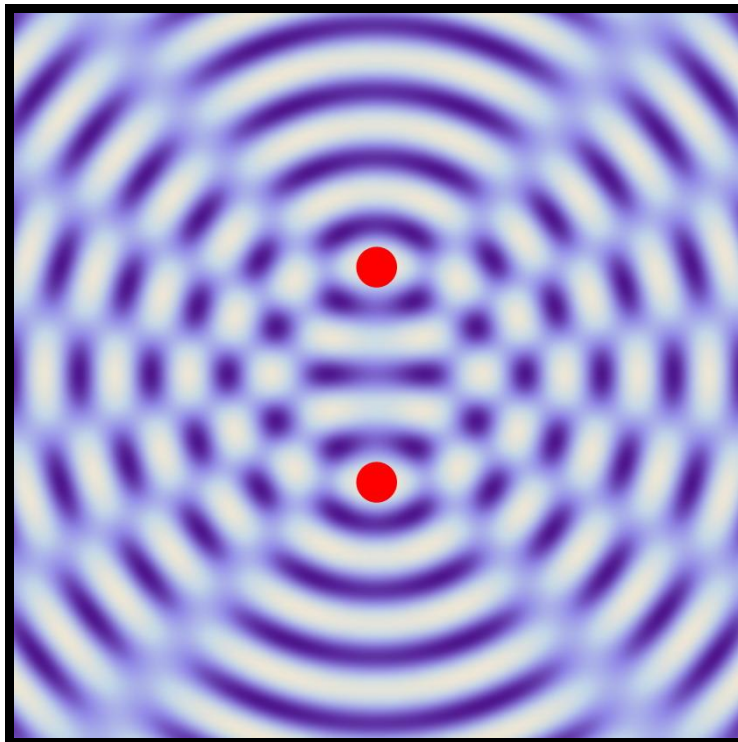
Ami azt jelenti, hogy a **hullámok akadállyal találkozva a haladási iránytól elhajlanak, oldal irányban kiterjednek, és így a forrásuktól olyan helyekre is képesek eljutni, melyek takarásban vannak** – ahogyan az alábbi képen látható. (A sötétebb színek hullámvölgyet, a világosabbak hullámhegyet jelentenek.)



Hasonlóan, ha például egy „részecske” egy lyukon halad át, nemcsak a lyukkal szemben, hanem attól eltérő irányokban is megjelenhet, amikor összeomlik.

- A hullámok összeadódása (interferencia)

Amikor különböző hullámok találkoznak, azok összeadódnak. Ennek folytán például ahol két hullám **hullámhegyei találkoznak, dupla magas hullám** jelenik meg, ahol pedig **hullámhegy hullámvölgygel találkozik, kioltják egymást**. Az interferenciát az alábbi kép szemlélteti, melyen két, körrel jelölt hullámforrás hullámai összegződnek.



A „részecskék” önmagukkal képesek interferálni. Ez akkor jön létre, amikor a „részecske” szétkenődött állapotban különálló darabokra válik, majd ismét egyesül, ahogyan az az alábbi kétréses kísérletben történik.

A hullámjelenségekről bővebben lásd az 'Érdekes fizikai jelenségek' témában.

Az összeomlott részecskék tehát hagyományos részecskeként, a szétkenődött „részecskék” pedig hullámként viselkednek. Ez ő **kettős természetük**. Ez a kettős természet pedig **minden „részecskére” jellemző**, beleértve az anyagi „részecskéket” is, mi több, a molekulákat és a nagyobb testeket is.

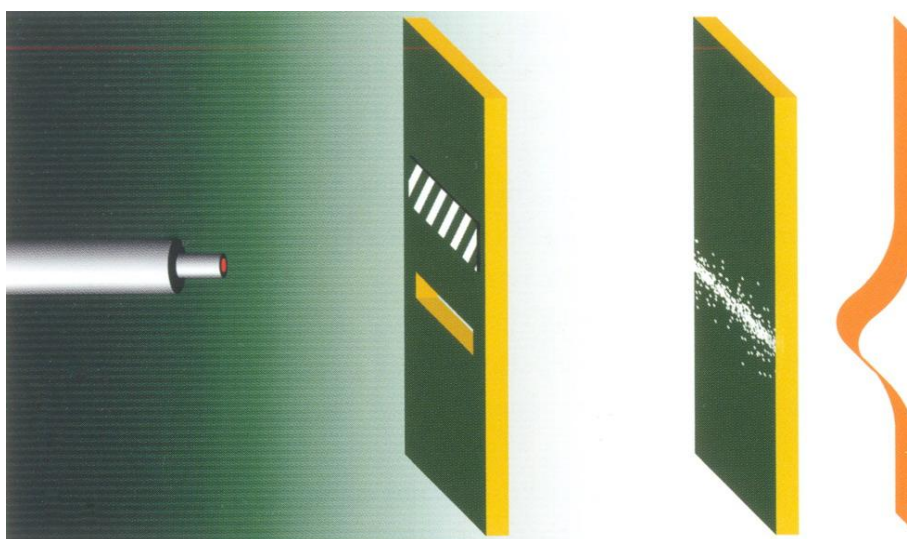
A hullámhossz azonban a tömeggel csökken, valamint a nagyobb dolgokat egyre nehezebb elszigetelni a környezetüktől, ezért **a hullámtermészetet mind nehezebb megfigyelni**. A molekuláknál nagyobb dolgok esetén ez nem is sikerült eddig.

3. A kétréses kísérlet

Mely jól szemlélteti a „részecskék” szétkenődését, összeomlását és kettős, részecske-hullám természetét.

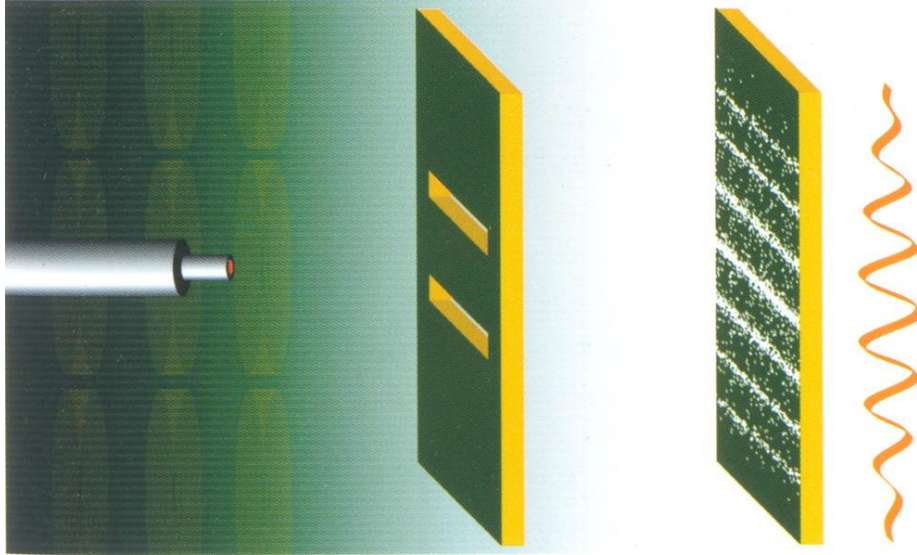
A kísérlet úgy néz ki, hogy van egy „részecske” forrásunk, egy falunk rajta két réssel, a fal túloldalán pedig egy érzékelő ernyőnk. A forrásból egymás után sokszor indítunk egyszerre mindig csak egy-egy „részecskét”, az ernyőn pedig figyeljük, hogy az egymás után beérkező részecskék milyen mintázatot rajzolnak ki összességükben.

Ha az egyik rést letakarjuk, a következőt látjuk.



Vagyis egyszerűen a nyitott réssel szemben **egy sávban** érkeznek meg a részecskéink. Ez nem is meglepő, az ember ezt várná hagyományos részecskék esetén. (Bár a hullámelhajlás már itt is jelentkezik: nem csak pontosan a réssel szemben, hanem attól kissé eltérő irányokban is érkeznek be részecskék β .)

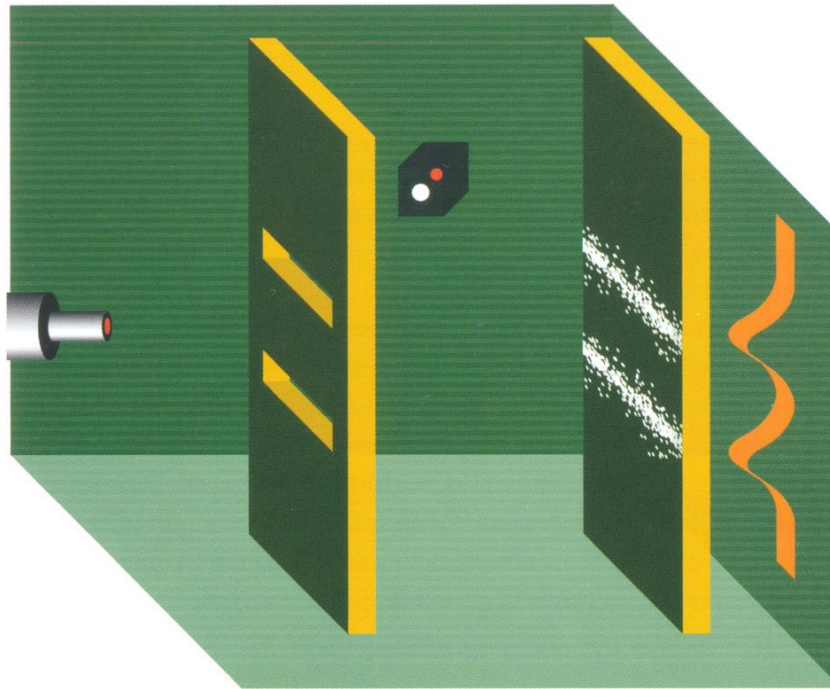
Meglepőbb azonban, amit akkor tapasztalunk, **ha az eddig letakart rést is kinyitjuk**.



Ekkor ahelyett, hogy egyszerűen a másik réssel szemben is megjelenne egy sáv, **több sávot látunk kirajzolódni**, ami arra enged következtetni, hogy valami hullámszerű kel át a réseken, ami aztán önmagával interferál. Ez a fentebbi, hullámelhajlást és -összeadódást szemléltető ábrákhoz hasonlóan történik: a „részecske” forrásunkból kiindul egy hullám, ami azonban most nem egy, hanem két résen hatol keresztül, a fal túloldalán így két, oldal irányban szétterjedő hullám keletkezik, melyek interferenciára lépnek egymással, így alakítva ki a sávokat.

Fontos kiemelni, hogy itt a **„részecskéket” egyenként indítjuk** a forrásból, így azok önmagukban mutatnak hullámszerű viselkedést. (A fényt hagyományosan hullámnak tekintették, ezért ha a részecskeforrásunk helyett egy lámpát (lézert β) használunk, és az ernyőnkön interferenciasávokat látunk, az nem túl meglepő.) Fontos továbbá, hogy **ez a minta** nemcsak fotonok, hanem **anyag** **„részecskék” és molekulák esetén is megjelenik**.

Hogyha hiteltlenségünkben megpróbáljuk leleplezni, hogy akkor melyik résen is jutnak át a részecskék, és e célból az egyik mellett elhelyezünk egy **detektort**, ami jelzi, ha ott haladnak el, akkor eltűnik az interferencia mintázat, és azt tapasztaljuk, amit eredetileg vártunk volna: **két sávot** a két réssel szemben – holott a detektor üzembe helyezésén kívül semmi nem változott.



Ekkor az történik, hogy a „részecske” kapcsolata a detektorral (amely a környezet része) kiváltja az összeomlást: **a „részecske” már a réseknél kiválasztja, hogy az egyiknél vagy a másiknál van**, innentől kezdve pedig már nem tud önmagával interferálni. Látható módon, mivel csak az egyik rés mellett van detektor, ez az esetek felében úgy történik meg, hogy a részecske a másik résnél találja magát, a hagyományos részecske tehát nem találkozik a detektorral, nem lép vele kölcsönhatásba, és az nem is jelez.

A kísérlet egy kifinomultabb változatában **csak azután döntenek el, hogy bekapcsolják-e a detektort, hogy a „részecske” már elhagyta a réseket**, azaz amikor elvileg már választania kellett volna, hogy hagyományos részecskeként vagy hullámként jut keresztül rajtuk. Ha végül bekapcsolt detektorral találkozik, akkor így is rendre hagyományos részecskeként teszi ezt, egyébként pedig hullámként – olyan tehát, mintha előre tudná, hogy mi fog vele történni a jövőben. (Ez Wheeler késleltetett választásos kísérlete. Lényeges, hogy a döntés is csak azután születik meg a detektor bekapcsolásáról, hogy a „részecske” már elhagyta a réseket. Így nem az történik, hogy az az adott időben „letapogatja” maga előtt az utat, hanem tényleg olyan, mintha a jövőbe látna. Lásd fentebb az összeomlásnál, hogy a környezettel való kapcsolat visszamenőlegesen is képes azt kiváltani.)

4. Az energia kvantumai

Az energia is **oszthatatlan csomagokban**, speciális részecskék segítségével terjed, valamint bizonyos természeti jelenségek csak meghatározott, **elkülönült energiaszinteken** képesek létezni.

Az említett csomagok az erőket közvetítő részecskék, melyek közül egy a foton, mely az elektromágneses erőt közvetíti a töltött részecskék között. (Egyedül a gravitáció esetén bizonytalan, hogy az is így működik.) E részecskék mellett, hogy az energiájukat egyben kapják és adják át, egyenként és lokálisan – vagyis egy adott helyen – reagálnak az anyaggal.

A részecskékkel történő erő és energia közvetítést egy analógiával szokták **szemléltetni**. Képzeljünk el **két embert, akik egy-egy csónakban állnak** a tavon. Ha egyikük eldob egy (nehéz) labdát, amit a másik elkap, akkor egymáshoz képest mindketten hátralendülnek. Hasonló dolog történik, amikor egy elektron kibocsát egy fotont, amit a másik elektron elnyel.

Fotonok azonban szabadon is létezhetnek, ilyenkor ők **a fény** (illetve általánosabban az elektromágneses sugárzás) **részecskéi**. Azt hihetnénk, hogy a fény annál nagyobb energiával rendelkezik, minél intenzívebb, fényesebb. Az összes hordozott energiára ez igaz is, de nem áll az egyes **fotonokra**. Ezeknek az **energiája a fény színétől, azaz a hullámhossztól függ**: minél rövidebb ez, minél kékebb a fény, annál nagyobb a fotonok energiája. Például ezért okoz leégést az UV sugárzás szemben a látható fényvel. Előbbiek részecskéi ugyanis képesek ionizálni a molekulákat alkotó atomokat, azaz megváltoztatni a töltésüket, ami szétfeszíti, roncsolja a molekulákat. A látható fény fotonjai, bármilyen sokan legyenek is, nem képesek erre, mivel egyenként nincs ehhez elég energiájuk.

Érdeemes tisztázni, hogy **az energia milyen értelemben darabos, kvantizált**.

- Először is abban az értelemben, hogy oszthatatlan csomagokban, **részecskék formájában terjed**, mint a foton. A foton az energia egy kvantumja, az adott hullámhosszú fény által szállítható legkisebb energiamennyiség.
- Másodszor, ezek a csomagok úgy jönnek létre, hogy **számos fizikai jelenség csak meghatározott, elkülönült, diszkrét energiaszinteken képes létezni**. Ilyenek elsősorban az atomok gerjesztett állapotai. Ez azt jelenti, hogy az atom körül keringő elektronok csak meghatározott pályákon lehetnek jelen, melyek mindegyikéhez tartozik egy meghatározott helyzeti energia. Az elektronok e pályák között hirtelen ugrálnak át, miközben olyan fotonokat nyelnek el vagy bocsátanak ki, melyek megfelelnek a pályákhoz tartozó energiák különbségeinek. (Az ettől eltérő energiát hordozó fotonok nem befolyásolják őket β .) Az elektronpályák tehát kvantizáltak, nem olyanok, mint a bolygópályák, melyek akármilyen távol lehetnek a Naptól. Egy másik hasonlóan kvantizált jelenség a molekulák rezgésállapotai.
- De nem minden kvantizált, **vannak folytonos energiaszintekkel rendelkező jelenségek is**, mint például a testek, molekulák, részecskék mozgása és forgása. Mint látható tehát, **nem arról van szó, hogy az energiának lenne egy általános legkisebb egysége** kvantuma, aminél nincsen kisebb. Egyrészt a folytonos energiaszintekkel rendelkező jelenségek állapotai bármilyen kicsi energiában különbözhetnek egymástól, másrészt akármilyen kicsi energiájú csomagok létezhetnek.

(@@ Lásd még itt a kérdések között a fotonok természetéről szólókat.)

Végül fontos kiemelni, hogy **az erőket közvetítő részecskék is képesek a szétkenődésre**, „részecskévé” válhatnak. Itt azért használtam a szót idézőjelek nélkül, hogy a darabosságot hangsúlyozzam.

5. A határozatlansági elv

Ez azt mondja ki, hogy a hagyományos **részecskék bizonyos tulajdonságpárjai nem ismerhetők meg egyszerre tetszőleges pontossággal**. A legjellemzőbb, hogy egy anyagi részecskéről, például egy atomról β , nem lehet egyszerre tudni, hogy pontosan hol van, és pontosan merre, milyen sebességgel halad: minél pontosabban tudjuk az egyiket, a másikban szükségképpen annál bizonytalanabbak leszünk.

Pontosabban nem lehet egyszerre tudni a részecske helyzetét és lendületét. Ezeken kívül azonban **más ilyen tulajdonságpárok is vannak**, ilyen például fotonok esetén az energia és az idő, amikor ez az energiaszint fennáll. (Mivel az energia megállapításához a fotonok által alkotott fény frekvenciáját kell megmérni, ami időbe telik, hiszen ki kell várni, hogy a fényhullám fázisa változzon.) β (@@ Korrekt ez így?)

Ez a bizonytalanság nem a rendelkezésre álló műszerek pontatlanságából fakad, hanem egy **elvi korlát**, melyet akármilyen jó műszerekkel sem lehet átlépni.

Fontos leszögezni, hogy **a szétkenődés és a határozatlansági elv által leírt bizonytalanság két teljesen különböző dolog**. Az előbbi valami olyan, ami a „részecskékkel” valóban megtörténik, az utóbbi pedig a tudásunk határa, amit egy hagyományos részecskéről képesek lehetünk szerezni.

A határozatlansági elv ötlete, és az azt leíró matematikai képlet is abból származik, hogy **a részecskéket nem tudjuk úgy megfigyelni, hogy meg ne zavarjék őket**. A makrovilágban rendszerint úgy szerzünk tudomást a dolgokról, hogy látjuk a róluk visszaverődő fényt. A mikrovilágban is hasonlóan kell eljárunk: valamit (pl. egy foton) „hozzá kell vágnunk” a dologhoz, hogy megfigyelhesük, amint visszaverődik róla – amivel azonban megzavarjuk, ami bizonytalanná teszi a tudásunkat. Konkrétan, minél pontosabban szeretnénk megtudni valaminek a helyzetét, a fényelhajlás csökkentése, így a felbontóképesség növelése céljából annál kisebb hullámhosszú, egyúttal annál nagyobb energiával rendelkező fotonot kell használnunk, ezáltal annál inkább megzavarjuk a részecske mozgását.

A fizikusok azonban újabban nem szeretik ezt a magyarázatot. Helyette azt mondják, hogy a bizonytalanság a mikrovilágot leíró modelltől következik, vagyis egy adottság: így működik a világ és kész. Számomra azonban úgy tűnik, hogy a modellbe egyszerűen ez a megzavarás épül be β .

Valójában **kérdés, hogy a megismerni kívánt tulajdonságok léteznek-e** annál pontosabban, amennyire képesek vagyunk megismerni őket. (Ne feledjük, itt hagyományos részecskékről van szó. Lehet tehát, hogy ebben az állapotban sem teljesen meghatározottak ezek tulajdonságai.) A fizikusok az ilyen kérdéseket azzal szokták elintézni, hogy ez nem a fizika tárgya, mivel az azzal foglalkozik, amit tudhatunk. Az, hogy a határozatlanság a megzavarás miatt áll fenn, azzal lenne konzisztens, hogy a tulajdonságok egyébként meghatározottak, csak megismerni nem tudjuk őket. Mivel azonban a határozatlansági elv által megsabottnál nem tudhatunk pontosabban, a kérdést valószínűleg nem lehet eldönteni – és egyúttal azt sem, hogy a megzavarás okozza-e a határozatlanságot β .

Lásd az ide vonatkozó kérdéseket alább.

6. Összefonódás

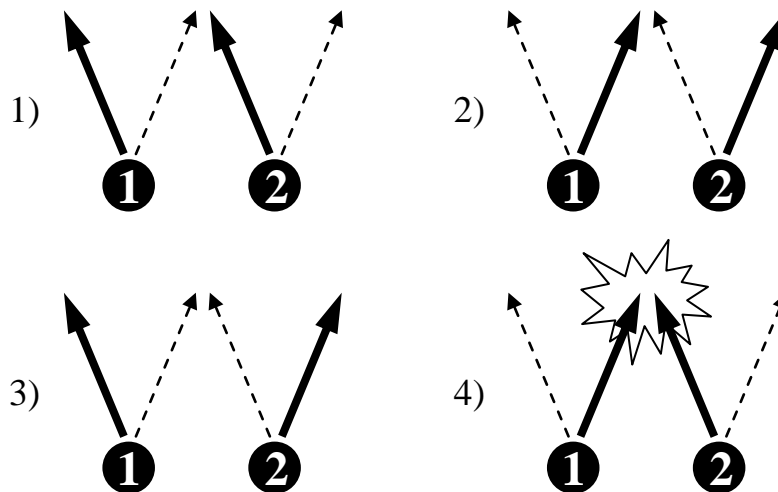
Ahogy már fentebb utaltam rá, az összefonódás akkor jön létre, amikor (nem túl nagy számú) szétkenődött „részecske” kapcsolatba kerül egymással. Ekkor ahelyett, hogy összeomlanának, egy **kombinált szétkenődött rendszert** alkotnak, mely egyszerre van az egész rendszer összes lehetséges kombinált állapotában.

Két „részecske” akkor kerül kapcsolatba, ha mindkettőnek van olyan megengedett hagyományos állapota, ahol kölcsönhatásba lépnének egymással.

Például egy elektront „részecskévé” lehet alakítani úgy, hogy egyszerre legyen két helyen, például a kiindulási helyétől balra és jobbra. Ha most ugyanezt elvégezzük egy másik elektronnal úgy, hogy az egyik helyen találkozzon az első szétkenődött elektronnal, a két „részecske” összefonódik. Az általuk alkotott rendszer most – a szétkenődésnél leírt értelemben – egyszerre lesz négy állapotban, úgymint:

- 1) Mindkettő balra ment és nem találkoztak.
- 2) Mindkettő jobbra ment és nem találkoztak.
- 3) Az első balra, a második jobbra ment, és nem találkoztak.
- 4) Az első jobbra, a második balra ment, és találkoztak (és egyúttal valahogyan kölcsönhatásba léptek, például visszapattantak egymásról).

Így:



(@@@ Jó ez a példa? Fotonnal biztosan meg lehet tenni ezt a kettéosztást, egy félig átlátszó tükörrel, de azok nem hatnak egymásra. Elektronnal is meg lehet csinálni?)

Ha ezek után az összefonódott rendszer újabb „részecskék” nagy tömegével kerül kapcsolatba (illetve a környezettel), bekövetkezik az **összeomlás**, ami **a teljes rendszert azonnal egy meghatározott hagyományos állapotba helyezi**. Mint fent említettem, ez a rendszer azon tagjai esetén is megtörténik, melyek maguk közvetlenül nem kerülnek kapcsolatba újabb „részecskékkel”, csak a rendszeren belüli társaikon keresztül. A furcsaság az, hogy közben a rendszer tagjai akár nagyon távol is kerülhetnek egymástól – **az egész rendszer összeomlása mégis pillanatszerűen** következik be. Vagyis lehet, hogy a rendszer egyik tagjától, az összeomlást kiváltó másik tag nagyon messze (akár fényévekre) van, előbbi mégis azonnal, a fény sebességénél sokkal gyorsabban értesül arról, hogy össze kell omlania.

7. Furcsa kapcsolatok

A kvantumvilágban mind térben, mind időben olyan kapcsolatok állnak fenn, melyek **teljesen ellentmondanak mindennapi tapasztalatainknak.**

A fentiekben ezeket már bemutattam, érdemes azonban összefoglalni őket:

1) Térbeli kapcsolatok

- Amikor a „**részecske**” egy kivételével az összes helyen azonnal megszűnik létezni az összeomlás pillanatában.
- **Az összefonódott rendszerek tagjai** közötti azonnali kapcsolat az összeomlás pillanatában.

Mint látható, ez a kettő gyakorlatilag egy dolog, **a hullámfüggvény azonnali összeomlása**, csak az utóbbi esetben egy kombinált hullámfüggvényről van szó. Ebben két furcsaság van: a kapcsolat **azonnalisága**, és az, hogy **nem tudni, mi közvetíti.**

Lásd fentebb az összeomlásról és az összefonódásról mondottakat.

2) Időbeli kapcsolatok

- Azaz, hogy a „**részecskék**” úgy viselkednek, mintha a **jövőbe látnának**, például amikor eldöntik, hogy részecskeként viselkednek, pedig csak később dől el, hogy bekapcsolják a detektort, ami miatt így kell tenniük. (Jövőbelátás helyett beszélhetünk az időben visszafelé ható dolgokról is.)

Mivel ezeket elvileg **nem lehet felhasználni információ továbbítására**, nem sértik a relativitáselméletet. (@@ Lásd itt a kérdések között egy ötletemet, amivel esetleg mégis lehetne a térbeli kapcsolatok segítségével információt küldeni.)

8. Egyebek

1) A relativitáselmélet és kvantumelmélet ellentmondása

Mivel **meglehetősen különbözik az alkalmazási területük** – az előbbi a gyorsan mozgó és nagy tömegű, míg az utóbbi a nagyon kicsi dolgokkal foglalkozik – a két elmélet általában nem kerül egymással kapcsolatba, és amikor külön-külön kell alkalmazni őket, mindkettő kiválóan működik. **Vannak azonban** az univerzumnak olyan körülményei, amikor a két elmélet egyszerre kellene alkalmazni. Ilyenek elsősorban a fekete lyukak, ahol nagy tömeg zsúfolódik össze kis helyre, és ilyen volt a korai univerzum, az ősrobbanás utáni állapotok. Ezért gyakorlati szempontból is jó lenne, ha a két elmélet összeférhető volna.

Sajnos azonban vannak arra utaló **jelek**, hogy ez nem így van. Ezek a tér nagyon kis méreteken történő vizsgálatok merülnek fel, az ott feltételezett, a határozatlansági elvnek köszönhető spontán „kvantum nyüzsgés” kapcsán. Lásd alább a „kvantum nyüzsgésre” vonatkozó kérdést. (@@ Van az ellentmondásnak valamilyen szemléletes bemutatása?)

Az is **elképzeltető** azonban, hogy **nem minden fizikai jelenség fakad egy tőről.** Így lehet, hogy a gravitációnak és a többi erőnek eltérő a természete, és ezért a velük foglalkozó elméleteket sem lehet egyesíteni. Lásd erről a ‘Világ eredete és életbarátsága’ téma ‘A végső axióma létezése és természete’ pontját. \$

2) Felnagyított kvantum események

Érdekes, hogy a kvantumjelenségek bizonyos következményeit mégis láthatjuk, akár a saját szemünkkel, mégpedig nagyon nagyban. **Az ősrobbanást követően ugyanis az egész világegyetem olyan kicsi volt**, hogy ezek a jelenségek lényegesen befolyásolhatták az univerzum szerkezetét; a tér azóta végbement tágulása pedig felnagyította és megőrizte az akkori történéseket a számunkra. β (@@Igaz ez? Van erre valami konkrét példa, hogy miben jelennek meg ma az akkori kvantum események?)

3) Kvantumszámítógépek és kvantum titkosítás

Az, hogy a „részecskék” egyszerre több állapotban lehetnek és összefonódhatnak egymással, lehetővé teheti, hogy **nagyon sok számítás végezzünk el egyszerre, párhuzamosan**. A kvantumszámítógépek sokkal gyorsabbak lehetnének a jelenlegiekénél, és olyan feladatokat is meg lehetne oldani velük, melyekre ma nem vagyunk képesek. Ilyen például a nagy számok prímtényezőkre bontása, amivel egy csapásra elavulttá válnának a jelenlegi legfejlettebb, széles körben használt titkosítási módszerek.

Ehhez ugyancsak a kvantumjelenségek szállíthatnák a helyettesítő megoldást, segítségükkel ugyanis **biztosítani lehet, hogy senki illetéktelen ne olvashasson el egy üzenetet észrevétlenül**. Valójában elég lenne így csak egy kulcsot továbbítani, melyet aztán az üzenet hagyományos módon rejtjelezett fő tömegének dekódolására lehetne használni.

A kvantumszámítógépek létrehozásának azonban jelentős **gyakorlati nehézségei** vannak, különösen az, hogy biztosítani kellene, hogy a szétkenődött „részecskék” kellő ideig megőrizzék ezen állapotukat, vagyis el legyenek szigetelve a környezetüktől, ameddig a számítások zajlanak.

4) Kvantum agy

Egyesek a kvantumjelenségek nem determinisztikus voltában próbálják megadni **a szabad akarat gyökereit**. Valószínűleg azonban nem ez a dolog nyitja: a kvantumvilág elemi véletlenszerűsége ugyanis nem sokkal áll közelebb a szabad akarathoz, mint a természet determinisztikus törvényei $\$$.

9. Alkalmazások

A kvantumelméletnek már jelenleg is **számtalan** gyakorlati alkalmazása van. Ilyenek a tranzistor (és általa az elektronikus számítógépek), a különféle diódák (például a LED), a lézer, az elektronmikroszkóp, valamint az MRI és PET készülékek, melyekkel az élő szervezet belsejéről lehet képeket készíteni.

Mellesleg a kvantumjelenségek felhasználásával lehet egyedül valódi véletlenszámokat generálni.

10. Kérdések @@

Ebben a pontban összegyűjtöttem a témával kapcsolatos kérdéseimet és saját elgondolásaimat. Ha ezekkel kapcsolatban tudsz segíteni, megköszönöm.

1) A fotonok természete

- **A fotonok tudnak-e részben elnyelődni?**

Esetleg úgy, hogy rögtön keletkezik egy új foton a maradék energiából. (A Compton-effektus azt sugallja, hogy ez, legalábbis bizonyos körülmények között, lehetséges.)

- **A folytonos energiaszintű jelenségek tudnak-e fotonokat kibocsátani / elnyelni?**

Különösen: ez történik az elektronok, protonok gyorsításakor? Ezek sebessége is ugrásszerűen változik a csomagok elnyelődésével? Az ilyenek minden fotont elnyelnek, amivel találkoznak? Utóbbi mellett szól a plazma átlátszatlansága, ami például a Napban figyelhető meg, de a korai univerzumra is jellemző volt.

- **A töltött részecskéken (elektron, proton, stb...) kívül más képes-e fotonokat közvetlenül kibocsátani / elnyelni?**

Például a molekulák rezgése. Esetleg a forgásuk, mozgásuk? Az atomok mozgása?

- **A fény hullámhossza ugyanaz, mint az a hullámhossz, ami az egyes fotonok szétkenődésekor tapasztalható?**

Utóbbi nevezhető a hullámfüggvény hullámhosszának?

2) Összeomlás

- **Csak a „részecskéről” szétterjedő információnak éppen megfelelő mértékig szűnik meg a szétkenődöttség? Vagy az összeomlás mindig minden tulajdonságot meghatározottá tesz?**

Csak azok a tulajdonságok válnak meghatározottá, melyekről információ jut ki a környezetbe? (Pl. a pozíció meghatározottá válik, de a spin nem.)

Adott tulajdonság is csak annyira válik meghatározottá, amennyit a környezet tudhat róla? (Érdekes kísérlet lenne, hogy két rés helyett hármat alkalmaznánk és csak az egyikhez raknánk detektort. Amikor nem találjuk ott a részecskét, a másik két rés vajon adna-e interferenciát? \$)

Egy összefonódott rendszer tud-e részben összeomlani?

- **A szétkenődés megszűnése tényleg pillanatszerű?**

A kiválasztott hagyományos állapot beálltáig a „részecske” teljesen szétkenődött állapotban marad? Mennyiben befolyásolja a „részecske” állapotait leíró információ fokozatos szétterjedése a szétkenődöttséget?

(A pillanatszerűség azért is látszik szükségszerűnek, mert minőségi különbség van a szétkenődött és hagyományos állapotok között. Szétkenődött állapotban nem arról van szó, hogy több hagyományos állapot van egymásra vetítve, mert akkor nem látnánk interferenciát a kétréses kísérletben. Ezért nem alternatíva a szétkenődöttségnek magának a fokozatos megszűnése, a be nem álló állapotok „elhomályosodása”. \$)

- **Mikor történik meg az összeomlás?**

A környezettel való kapcsolat mértékének van egy általános kritikus szintje, amit elérve bekövetkezik az összeomlás, vagy ez valahogy másképp történik? (Pl. a kapcsolat növekvő mértéke csak egyre valószínűbbé teszi, hogy adott időn belül megtörténik a választás.)

3) A hullámfüggvény és a határozatlansági elv

- A hullámfüggvény csak a pozíciót és a sebességet / lendületet írja le, vagy más, szétkenődésre alkalmas tulajdonságokat is? 1
- A határozatlansági elv a méréssel történő megzavarásból következik-e? A hullámfüggvényben ennek a formalizálása jelenik-e meg?
- Léteznek-e határozottan a határozatlansági elv miatt megismerhetetlen tulajdonságok? 2
- Van valamilyen bizonyíték a spontán „kvantum nyüzsgésre”?

A határozatlansági elvet nemcsak részecskékre szokták alkalmazni, hanem például az üres térre is. Ebből származik annak a gondolata, hogy nagyon kis méretekből az üres tér nem is üres, hanem viharos események zajlanak benne: részecskék keletkeznek és tűnnek el, a téridő pedig vadul hullámzik, gyűrődik. Ez a relativitáselmélet és kvantumelmélet fent említett ellentmondásának alapja is. Van arra valamilyen bizonyíték, hogy tényleg ez történik? β (@@ Amit itt tényként közlök, az ugye így van?) 3

4) Egy ötlet az azonnali információtovábbításra $\$B$

Ez elvileg nem lehetséges, mivel megsértené a relativitáselméletet. Ezért **könnyen lehet, hogy amit itt leírok az hibás.**

Hogy az ötlet működhessen az, kellene, hogy tudjunk készíteni egy két „részecskéből” álló összefonódott rendszert, úgy, hogy az egyik tagjáról később el lehessen dönteni, hogy az szét van-e még kenődve. Lehet, hogy ezt egy adott „részecskéről” nem lehet eldönteni, viszont ha sok, azonos módon kezelt „részecskét” vizsgálunk, akkor van rá lehetőség: lásd, ahogyan a kétréses kísérletben, szétkenődött „részecskék” esetén, kirajzolódik az interferencia mintázat. 4

Egy lehetőség ilyen párok készítésére az lenne, hogy az egyik részecske attól függően menjen az egyik vagy másik útvonalon, hogy a másik részecskének milyen valamelyik tulajdonsága. Utóbbi lehetne szintén útvonalválasztás, de más is (spin, stb... Nem tudom, hogy mivel lehetne ezt technikailag megoldani.) Az első „részecskéről” ezután úgy lehetne eldönteni, hogy szét van-e kenődve, hogy megvizsgálunk ad-e interferenciát, ahogyan a kétréses kísérletben láttuk. 5

A fent leírt „részecske” párokat folyamatosan készítenénk, és az egyiküket (azt, amelyikről meg lehet állapítani, hogy szét van-e kenődve) folyamatosan küldենék oda, ahová az üzenetet akarjuk továbbítani. Amikor ezek közül egy odaér, akkor a nálunk maradó párját attól függően hoznánk kapcsolatba a környezettel vagy sem, azaz omlasztanánk össze vagy sem, hogy a továbbítandó bit 1 vagy 0. A fogadó fél, ekkor megvizsgálná a saját „részecskéjét”, és abból, hogy azt szétkenődöttnek találja-e, megkapná az információt – hiszen a „részecske” pár másik tagjának összeomlása ezt is összeomlasztja. 6

Még egyszer: egy bit információ átviteléhez lehet, hogy sok „részecske” párra volna szükség, ha csak így lehet eldönteni a szétkenődöttség kérdését. Másrészt technikailag lehet, hogy jobb lenne félúton felállítani egy állomást, mely mindkét irányba küldözgetné a „részecske” párok tagjait, hogy ne kelljen sokáig szétkenődött „részecskéket” tárolni. Végül, a legjobb úgy volna, ha a „részecske” párokkal oda-vissza lehetne kommunikálni, azaz mindegy lenne, hogy a pár melyik tagját omlasztjuk össze, a másiktól el lehetne dönteni, hogy szét van-e még kenődve. 7

Referenciák

- *Jim Al-Khalili: Quantum - A Guide for the Perplexed*
- *Richard P. Feynman: Q.E.D. (Quantum Electro-dynamics)*
- *Charles Seife: Decoding the Universe*