

## Litet quiz om svarta hål och kvantfysik: facit på [www2.kau.se/tp/outreach](http://www2.kau.se/tp/outreach) Nedanför quizzet ger jag facit. Men försök själv först!

1. Vad är en gluon ("lim-partikel", från *glue* på engelska)?
  - a. En riktig (experimentellt upptäckt) partikel som "limmar ihop" protoner och neutroner i atomkärnan.
  - b. En tänkt (hypotetisk) partikel som "limmar ihop" protoner och neutroner i atomkärnan.
  - c. En kemisk beståndsdel i vanligt klister.
2. Vad fick Albert Einstein nobelpriset för?
  - a. Fotonen (kvantfysik).
  - b. Inget kan åka fortare än ljuset (speciell relativitetsteori).
  - c. Svarta hål (allmän relativitetsteori).
3. Vad är en gravitationsvåg, hur kan man detektera den? Svar: den sträcker och krymper själva rymden, så man sitter och väntar och mäter om avståndet mellan två objekt ändras.  
Men: det är en pytteliten längdändring, så hur mäter man den?
  - a. De två objekten är bollar, och man sätter en lång linjal mellan dem
  - b. De två objekten är speglar, och man studsar laserstrålar mellan dem
  - c. De två objekten är fotoner, och man studsar elektroner mellan dem
4. I de två detektorerna som kallas LIGO (i USA), hur långt bort är objekten i förra frågan från varandra?
  - a. 3 mm
  - b. 3 m
  - c. 3 km
5. Gravitationsvågorna som träffade detektorn LIGO kl 09.50 den 14:e september 2015, hur länge hade de färdats? (Bonusfråga: hur gammalt är universum?)
  - a. Över tusen år.
  - b. Över en miljon år.
  - c. Över en miljard år.
6. Hur hade just de gravitationsvågorna uppstått?
  - a. Ett svart hål "åt upp" materia omkring sig.
  - b. Två svarta hål kolliderade och bildade ett större svart hål.
  - c. Hawking-strålning.
7. Vad är "kvantum" i kvantfysik?
  - a. Minsta mängd av något, t.ex. ljus, mängden bestäms av Plancks konstant.
  - b. Största mängd av något, t.ex. massa, mängden bestäms av Newtons konstant.
  - c. Lagom mängd av något, t.ex. korv, och det har något att göra med matvaror.
8. Vilken av följande formler beskriver svarta hål och kvantfysik?
  - a.  $r_s = 2GM/c^2$  och  $E = hc/L$ .
  - b.  $F = ma$  och  $E = hc/L$ .
  - c.  $r_s = 2GM/c^2$  och  $E = mc^2$ .

9. Hur många gånger per sekund tar protonerna på CERN varvet genom 27-km-tunneln?
- 100
  - 1 000
  - 10 000
10. Hur kan stjärnor kretsa kring det svarta hålet utan att bli uppätta ?
- De åker väldigt fort, men till slut blir de uppätta.
  - De åker väldigt långsamt, så de påverkas inte av tyngdkraft.
  - De står egentligen stilla enligt relativitetsteori.
11. Vad tror en del forskare att partikeln som bär tyngdkraft enligt kvantfysik ("gravitonen) är uppbyggd av? (Den s.k. BCJ-dualiteten)
- Två elektroner
  - Två fotoner
  - Två gluoner
12. När materia faller in i ett svart hål, vad händer?
- Massan ökar
  - Massan minskar
  - Massan är oförändrad.
13. Vad var det som var kvantfysiskt i Hitachis dubbelspaltexperiment?
- Att det blev mörka och ljusa ränder, som det blir med en vanlig lampa
  - Att det blev mörka och ljusa ränder, fast det var en partikel åt gången
  - Att de mörka och ljusa ränderna hade en viss längd, den s.k. Planck-längden.
14.  
När kommer nya data från CERN, och vad söker de?
- Om 10 år, de söker gluoner
  - Om 1 år, de söker protoner
  - Om 1 vecka, de söker mörk materia

Lycka till! / Marcus

**På nästa sida kommer facit. Försök själv först!**

Här är rätt svar:

1a, 2a, 3b, 4c, 5c, 6b, 7a, 8a, 9c, 10a, 11c, 12a, 13b, 14c.

Här ger jag lite mer förklaring kring frågorna och några länkar.

1. Vad är en gluon ("lim-partikel", från *glue* på engelska)?

Svar: a. En riktig (experimentellt upptäckt) partikel som "limmar ihop" protoner och neutroner i atomkärnan.

Gluonen upptäcktes 1978 (direkt upptäckt: den indirekta upptäckten kan sägas vara några år tidigare). Gluoner med hög energi produceras idag i kopiösa mängder i partikelacceleratorer, faktum är att protoner med hög energi, som de som kollideras vid CERN, är till största del gluoner. Det finns alltså ingen tvekan att de finns. Två olika experiment tar äran för det, bägge vid tyska acceleratoren DESY i Hamburg, men ingen av dem fick nobelpris. Det här diskuterar vi på kursen *Inledande modern fysik* på Fysikprogrammet, och i avancerade kurser som *Kvantfältteori*.

2. Vad fick Albert Einstein nobelpriset för?

a. Fotonen (kvantfysik).

Einstein är mer känd för relativitetsteori, men nobelpriset var för fotoelektriska effekten: att det blir en ström om man lyser på en metall. Det är liknande men inte exakt samma som det som händer i en solcell, som är gjord av kisel som inte är en metall utan en s.k. halvledare. När solcellen träffas av solstrålar skapas en elektrisk ström som man kan fånga upp och leverera till elnätet. Den varianten av fotoelektriska effekten heter fotovoltaiska effekten. Det här diskuterar vi på kursen *Inledande modern fysik* på Fysikprogrammet, och i avancerade kurser som *Fysikalisk elektronik*.

3. Vad är en gravitationsvåg, hur kan man detektera den? Svar: den sträcker och krymper själva rymden, så man sitter och väntar och mäter om avståndet mellan två objekt ändras.

Men: det är en pytteliten längdändring, så hur mäter man den?

b. De två objekten är speglar, och man studsar laserstrålar mellan dem

Einsteins allmänna relativitetsteori förutsäger gravitationsvågornas existens, men åtminstone senare i sin karriär tyckte Einstein inte det verkade gå att detektera dem ens i princip, dvs. de "finns inte" enligt den vetenskapliga metoden där man måste kunna testa allt åtminstone i princip. Det är en fascinerande historia hur Einstein blev sur när forskningstidskriften *Physical Review* vägrade publicera hans forskningsartikel där han påstår att gravitationsvågor inte finns:

<http://physicstoday.scitation.org/doi/full/10.1063/1.2117822>

En grundbult i den vetenskapliga processen är *peer review*, att jämlingar (*peers*) skall utvärdera varandras forskningsartiklar, ofta anonymt via en redaktör, och det som är fel skall inte publiceras. Redaktören på *Physical Review* hittade alltså en oberoende expert (*referee*) som anonymt meddelade Einstein att han hade fel om något inom allmän relativitetsteori, Einsteins egen teori. Det är ett fint exempel på att den processen fungerade: tidskriften vek sig inte för Einsteins auktoritet.

4. I de två detektorna "LIGO" (i USA), hur långt bort är objekten i förra frågan från varandra?

c. 3 km

LIGO:s upptäcktsartikel finns på deras hemsida:

<https://www.ligo.caltech.edu/>

nämner att det var konferensen i Chapel Hill 1957, organiserad på paret DeWitts forskningsinstitut, där Richard Feynman föreslog det s.k. "*argumentet med den klubbiga pärlan*" för att förklara att vågorna som sträcker ut och trycker ihop själva rymden går att detektera.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Sticky\\_bead\\_argument](https://en.wikipedia.org/wiki/Sticky_bead_argument)

Det första konkreta förslag på ett laserinterferometer-experiment för att detektera dem kom 1967, inte förrän 1994 fick de till slut pengar att bygga två fullskaliga detektorer på 3 km, och de slog på

2002. Så hur länge de har väntat är definitionsfråga, men forskaren som gjorde skisserna 1967 är fortfarande med, liksom teoretiske fysikern Kip Thorne (som också var med och fixade svarta hålen i Hollywood-filmen *Interstellar*).

5. Gravitationsvågorna som träffade detektorn LIGO kl 09.50 den 14:e september 2015, hur länge hade de färdats? (Bonusfråga: hur gammalt är universum?)  
c. Över en miljard år.

Universum expanderar, se gärna min YouTube-video om kosmologi:

<https://www.youtube.com/watch?v=KbTlAvKqshE&t=166s>

så det är aningens komplicerat att ens definiera mycket långa avstånd, för vi mäter ju vågorna senare i universums utveckling än ögonblicket de skickades ut. Men enligt definitionen *luminositetsavstånd* var de två svarta hålen i alla fall 1,4 miljarder ljusår bort. Eftersom gravitationsvågor såvitt vi vet fortplantas med ljusets hastighet, skulle de alltså i ett statiskt universum ha färdats i 1,4 miljarder år. Det blir inte *precis* det, men över en miljard år är en bra uppskattning. Universum är knappt 14 miljarder år gammalt. Det här diskuterar vi på kursen *Universum – en resa i kosmos* på Fysikprogrammet, och i avancerade kurser som *Allmän relativitetsteori*.

6. Hur hade just de gravitationsvågorna uppstått?  
b. Två svarta hål kolliderade och bildade ett större svart hål.

LIGO-forskarna gjorde detaljerade studier av vågformen, som först simulerades av Frans Pretorius (vars handledare Matt Choptuik undervisade min kurs i numerisk relativitetsteori på forskarutbildningen) år 2005. Här är Frans som berättar:

<https://www.youtube.com/watch?v=xj6vV3T4ok8>

(Paneldebatt-ledare är Brian Greene, som forskar i strängteori och har skrivit den fina boken "Fabric of the Cosmos", på svenska heter boken *Det stoff varav kosmos väves*, översatt av den teoretiske fysikern Hans-Uno Bengtsson från Lund, strax innan han hastigt avled vid 54 års ålder.) Från den detaljerade studien räknade de ut att de ursprungliga två svarta hålen hade 30 respektive 35 solmassor, och svarta hålet som blev kvar hade 62 solmassor, så 3 solmassors motsvarighet i energi strålades ut som gravitationsvågor, enligt relationen  $E = mc^2$  mellan energi och massa.

7. Vad är "kvantum" i kvantfysik?  
a. Minsta mängd av något, t.ex. ljus, mängden bestäms av Plancks konstant.

Om man skall vara petig så bestäms energin i en foton av Plancks konstant  $h$  samt även ljushastigheten  $c$ , formeln är  $E = hc/L$  där  $L$  är våglängden hos ljuset, t.ex. runt 500 nanometer för grönt ljus, som ger runt  $4 \cdot 10^{-19}$  J energi för en foton av grönt ljus. Någon mindre energimängd finns alltså inte för grönt ljus enligt kvantfysik. Men eftersom den energin är så liten i vardagsenheter så märker vi sällan att ljus består av partiklar. Å andra sidan behövs bara några enstaka fotoner för att mänskliga ögat skall reagera, och detsamma för känsliga digitalkameror. En mer praktisk enhet för små energier är *elektronvolt* (eV) den energi en elektron får om den accelereras genom en elektrisk spänning av 1 volt: en foton av grönt ljus har energin 2,5 eV. Det här diskuterar vi på kursen *Inledande modern fysik* på Fysikprogrammet, och i avancerade kurser som *Kvantfysik I* och II.

8. Vilken av följade formler beskriver svarta hål och kvantfysik?  
a.  $r_s = 2GM/c^2$  och  $E = hc/L$ .

Den första är Schwarzschildradien, radien hos ett svart hål med massa  $M$ . Konstanten  $G$  är Newtons gravitationskonstant, samma som i Newtons gravitationslag  $F = Gm_1m_2/r^2$ .

9. Hur många gånger per sekund tar protonerna på CERN varvet genom 27-km-tunneln?  
c. 10 000

De accelereras till energin 6,5 TeV (tera-elektronvolt) som är mycket nära ljusets hastighet, så man tar 27 km och räknar ut vilket bråkdel av en sekund ett varv tar enligt  $s = vt$ . Se min video om partikelfysik:

<https://www.youtube.com/watch?v=oXvwmwK6mZw>

10. Hur kan stjärnor kretsa kring det svarta hålet utan att bli uppätta ?

a. De åker väldigt fort, men till slut blir de uppätta.

11. Vad tror en del forskare att partikeln som bär tyngdkraft enligt kvantfysik ("gravitonen") är uppbyggd av? (Den s.k. BCJ-dualiteten)

c. Två gluoner

Det här diskuterar vi på avancerade kursen *Strängteori*, men ny forskning hamnar mest på forskarutbildning (när man är "doktorand").

12. När materia faller in i ett svart hål, vad händer?

a. Massan ökar

13. Vad var det som var kvantfysiskt i Hitachis dubbelspaltexperiment?

b. Att det blev mörka och ljusa ränder, fast det var en partikel åt gången

Det är viktigt att det är en åt gången. Att det blir interferens händer även med klassiska ljusvågor, alltså innan kvantfysik.

14.

När kommer nya data från CERN, och vad söker de?

c. Om 1 vecka, de söker mörk materia

De skulle vara nöjda med vilket nytt fenomen som helst, men mörk materia är en uttrycklig sökstrategi. Konferensen är Moriond i Italien, men har de några spännande nyheter, titta i New York Times. (Svenska tidningar missar ibland helt stora fysiknyheter.)

Tack för visat intresse! / Marcus