

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

1. Det svarta hålet som jag visade stjärnor som kretsar kring ligger i centrum av...
 - a. Solsystemet
 - b. Vintergatan
 - c. Universum
2. Man säger också ibland att det svarta hålet "ligger i Skytten", vad menas med det?
 - a. En av stjärnorna i stjärnbilden Skytten har kollapsat till ett svart hål
 - b. Det svarta hålet ligger i samma riktning på himlen som stjärnbilden Skytten, men längre bort
 - c. Det går inte att säga om det ligger nära Skytten eller inte, så stora avstånd går inte att mäta
3. Hur kan stjärnor kretsa kring det svarta hålet utan att bli uppätta ?
 - a. De åker väldigt fort, men till slut blir de uppätta.
 - b. De åker väldigt långsamt, så de påverkas inte av tyngdkraft.
 - c. De står egentligen stilla enligt relativitetsteori.
4. När materia faller in i ett svart hål, vad händer? Det svarta hålets massa och radie...
 - a. ökar
 - b. minskar
 - c. är oförändrade.
5. 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
6. I de två detektorna som kallas LIGO (i USA, samarbetet som fick nobelpriset i fysik 2017), hur långt bort är objekten i förra frågan från varandra?
 - a. 3 mm
 - b. 3 m
 - c. 3 km
7. 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.
8. Vad var det Kip Thorne på LIGO hade slagit vad med mig (och andra) om, beträffande gravitationsvågor?
 - a. Att LIGO skall detektera vågorna före vi teoretiker lyckas simulera dem på en dator.
 - b. Att vi teoretiker skall lyckas utesluta att vågorna finns.
 - c. Att strängteori ger en korrekt beskrivning av de svarta hål som LIGO studerar.

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

- a. 100
- b. 1 000
- c. 10 000

10. Hur stora är detektorerna nere i grottorna på CERN, och varför?

- a. 11 meter höga, för strålsäkerhet när man har tunga partiklar
- b. 22 meter höga, för att böja av tunga partiklar med magnetfält
- c. 33 meter höga, för att stoppa alla tunga partiklar helt

11.

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

- a. Om 10 år, de söker Higgs-partiklar
- b. Om 1 år, de söker protoner
- c. Om 2 månader, de söker mörk materia

12.

På ITER slår man ihop deuterium och tritium. Varför ger det energi?

För lågt atomnummer är *bindningsenergin per kärnpartikel* en ...

- a. stigande funktion av atomnummer
- b. sjunkande funktion av atomnummer
- c. konstant

13.

ITER-bygget skall vara klart

- a. 2021
- b. 2025
- c. 2029

14.

Följande är ett felaktigt påstående om något som är bra med fusion på ITER:

- a. väggarna blir inte radioaktiva
- b. restprodukten helium är stabil
- c. deuterium och tritium utvinns från vatten

Lycka till! / Marcus

På nästa sida kommer facit. Försök själv först!

Här är rätt svar:

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

Nedan ger jag lite mer förklaring kring frågorna och några länkar. Du behöver ju inte läsa igenom alltihop — det var säkert några frågor du var mer nyfiken på än de andra.

1. Det svarta hålet som jag visade stjärnor som kretsar kring ligger i centrum av...
- b. Vintergatan

Centrum av Vintergatan är ett väldefinierat område ungefär 28 000 ljusår bort i riktningen av stjärnbilden Skytten. Universum har inget centrum, men trodde du att det hade ett är du i gott sällskap rent vetenskapshistoriskt, de flesta människor tror nog det även idag:

[History of the center of the Universe](#) (Wikipedia)

Men universum (själva rummet, eller egentligen rumtiden) växer, och alla observatörer tycker att alla andra galaxer rör sig bort från dem. Går man tillbaka i tiden mot Big Bang var universum mindre och mindre och vid Big Bang var alla punkter i universum väsentligen i "centrum". Men då är isåfall alla punkter i universum "centrum" även idag, eftersom vi alla kom från det ursprungliga "centrat". Men det motsäger vardagskonceptet av centrum, som inte kan vara överallt, så det är bättre att säga att universum inte har något centrum. Se gärna min YouTube-video om kosmologi (samma som ovan) där jag tar upp *liknelsen om bulldegen* för att försöka förklara det:

www.youtube.com/watch?v=KbTlAvKqshE&t=166s

2. När jag sade att det svarta hålet som stjärnorna kretsar kring ligger i Skytten, vad menas då?
- b. Det svarta hålet ligger i samma riktning på himlen som stjärnbilden Skytten, men längre bort

Som jag skriver mer om nedan beror avstånd lite grand på definitioner när något är väldigt långt bort, men den komplikationen spelar ganska liten roll upp till ungefär en miljon ljusår bort, och svarta hålet Sgr A* är ungefär 28 000 ljusår bort, mycket mindre än en miljon, så man behöver inte ta hänsyn till skillnad på olika meningar av avstånd. I vilket fall som helst ligger stjärnorna i Skytten mellan 10 och några hundra ljusår bort, ungefär som i Perseus (fast där är närmsta stjärnan 33 ljusår bort). Det vill säga, alla stjärnor i alla stjärnbilder vi ser med blotta ögat ligger närmare oss än Vintergatans centrum vid Sgr A*, men det är inte ofantligt mycket längre bort, 28 000 istället för några hundra.

Alla stjärnorna i en typisk stjärnbild ligger alltså inte nödvändigtvis jättenära varandra utan kan vara hundratals ljusår ifrån varandra. Det är för att de skickar ut olika mycket ljus och därför kan vara olika långt bort i djupled, även om de ser ut att lysa ungefär lika starkt på himlen. Hur mäter då astronomer avstånd, om man inte kan avgöra enbart från ljusstyrka hur långt bort en stjärna är? Det är en lång och spännande historia:

[Cosmic distance ladder](#)

På kursen *Universum* har vi en bra kursbok av Freedman & Kaufmann, som passande nog heter kort och gott "Universe", där de diskuterar det här i ganska stor detalj och med fina bilder. Nivån är lite över den mest grundläggande populärvetenskapliga nivån, men den är ändå väldigt läsbar.

3. Hur kan stjärnor kretsa kring det svarta hålet utan att bli uppätta ?
- a. De åker väldigt fort, men till slut blir de uppätta.

Om man skall vara tydlig är det inte alls *säkert* att alla de här stjärnorna verkligen kommer att falla in i det svarta hålet, det beror på många detaljer i rörelsen; om det var bara en stjärna så skulle den kunna ha en stabil bana och aldrig falla in. Eftersom det är många stjärnor (och även annat material) i ett ganska litet område så bör de påverka varandra, så det är en komplicerad fråga när och hur någon av dem faller in. Säkert är att de inte kommer att falla in de närmsta åren. Det kom nyligen en [360-graders interaktiv video](#) av hur det kanske ser ut, baserad på data från ett rymdteleskop som heter Chandra, som jag har arbetat lite med.

Poängen i den här frågan var den motsatta: många tror att stjärnorna borde falla in på en gång

utan att ens kunna ta ett varv runt, för att det svarta hålet drar så hårt i dem, men bara de åker tillräckligt fort så är situationen ungefär som den i vårt solsystem: om jorden inte skulle kretsas kring solen men ganska stor fart skulle den falla in i solen. På samma sätt, om inte Internationella rymdstationen ISS skulle kretsas kring jorden med stor fart skulle den falla ned på marken. Hur stor fart den måste ha räknar vi ut i vår grundkurs *Mekanik*, sedan mer effektivt i den avancerade kursen *Analytisk mekanik*.

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

a. Massan ökar

I formeln $r_s = 2GM/c^2$ för Schwarzschilds matematiska beskrivning av ett svart hål med massa M är G och c naturkonstanter, så svarta hålets radie r_s ("händelsehorisonten", avståndet från svarta hålets mitt där gravitationen är så stark att inte ens ljus kan ta sig ut) är proportionell mot massan. Man brukar ibland beskriva ett svart hål som en "glupsk jätte": ju mer det äter, desto tjockare blir det.

5. 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:

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.

6. 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:

ligo.caltech.edu

Den nämner att det var konferensen i Chapel Hill 1957, organiserad på paret DeWitts forskningsinstitut (DeWitt var min handledare på forskarutbildningen), där Richard Feynman föreslog det s.k. "*argumentet med de klibbiga pärlorna*" för att förklara att vågorna som sträcker ut och trycker ihop själva rymden går att detektera:

[Sticky bead argument](#) (Wikipedia)

Det första konkreta förslaget på ett laserinterferometer-experiment för att detektera dem kom 1967, inte förrän 1994 fick de till slut tillräckligt med pengar att bygga två fullskaliga detektorer på 3 km, och de slog på detektorn 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*).

7. 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 som ovan:

youtube.com/watch?v=KbTIAvKqshE&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*.

8. Här är länken till Thornes nobelföreläsning, december 2017: youtu.be/TZLvEp_xjnY?t=13m26s

Som Thorne förklarar i videon gäller det att simulera två svarta hål som kolliderar (eller snarare faller in i varandra) på en dator, eftersom det antas vara den med våldsamma händelsen som händer ute i universum, när det gäller att skicka ut mycket gravitationsstrålning, och därför en av de mest sannolika att se i detektorerna. (Energien som skickades ut i just den kollision av två svarta hål som sedan detekterades i september 2015 var 10^{49} W, större i det ögonblicket de skickades ut än energin som strålas ut av alla stjärnor i universum tillsammans.) Som han också förklarar är poängen med det att experimentet i praktiken måste söka efter en viss vågform; det är för mycket brus i experimentet för att kunna söka utan att ha någon "mall" att leta efter. Om ingen har räknat ut den mallen blir det svårt. Det är en stor datorsimulering och kräver både stor teoretisk förståelse (räkningar för hand) och stor kunskap om superdatorer. Jag arbetade inte direkt med den typen av simulering, men jag arbetade med några av experterna och tyckte det kändes värt att skriva på vadet när Thorne kom till oss 1997 och föreslog det. Det var ju dessutom rätt bra odds eftersom vi var 28 stycken och vi bara måste köpa en flaska vin åt vinnaren. Det första genombrottet var av Frans Pretorius 2005. Frans började som forskarstudent ungefär när jag gick ut. Sedan gick det stadigt framåt, och 2016 gav Thorne upp vadet. (Som han säger i videon så ville han ju egentligen förlora. Det var som när han slog vad med Hawking 1976, men då var det Hawking som ville förlora.) 2016 hade LIGO redan detekterat vågorna, men de simulerade vågformerna var då så bra att de väldigt väl motsvarade det som faktiskt träffade detektorn.

Bonus-faktum: jag kan säga med säkerhet att Thorne har fel datum på vadet i videon, eftersom jag inte började i Texas förrän 1996!

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 $s = vt$: sträcka är hastighet gånger tid. Se min video om partikelfysik:

youtube.com/watch?v=oXvwmwK6mZw

10. Hur stora är detektorerna nere i grottorna på CERN, och varför?

- a. 11 meter höga, för strålsäkerhet när man har tunga partiklar
- b. 22 meter höga, för att böja av tunga partiklar med magnetfält
- c. 33 meter höga, för att stoppa alla tunga partiklar helt

De yttre s.k. *myon-kamrarna* är en av anledningarna att detektorerna är så stora som 22 m. (Det är två stycken stora detektorer, de heter ATLAS och CMS.) Myoner är tyngre kusiner till elektronen (samlingsnamn för de två är *leptoner*). Det är ungefär som att böja av banan för en lastbil kontra en liten personbil; det krävs längre sträcka för myoner att "svänga av" i ett externt magnetfält som läggs på.

Om man skall vara petig: de är lite olika höga, ATLAS är officiellt 25 m hög, medan CMS är lite mindre. Men man räknar då med några meter som inte direkt är del av detektorn, så 22 m är det mer

relevanta tal man ofta hör för ATLAS.

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

c. Om 2 månader, de söker mörk materia

De skulle vara nöjda med nästan vilket nytt fenomen som helst, men mörk materia är en uttrycklig sökstrategi för CERN. De kunde ha hittat mörk materia 2017 (de kör nu med dubbel energi jämfört med då de hittade Higgs-partikeln 2012) men hittade ingenting. De skall börja köra igång igen i mars, men tidigast kanske i april eller maj börjar det hända något. Kommer några spännande nyheter, titta i New York Times eller BBC. (Svenska tidningar missar ibland helt stora fysiknyheter när de händer.) Sedan tar det årtal att gå igenom de ofantliga datamängderna, men skulle de ha tur och hitta något tydligt brukar det ibland börja gå rykten inom några månader.

12. På ITER slår man ihop deuterium och tritium. Varför ger det energi?

För lågt atomnummer är *bindningsenergin per kärnpartikel* en ...

a. stigande funktion av atomnummer

Jag syftar på [den här grafen](#), som man ibland diskuterar redan på gymnasiet. Den beskriver bindningsenergi, som är ritad som positiv i grafen, men som man gärna kan tänka på som *negativ*, jämför potentiell energi från tyngdkraft $V = -GM/r$. Det betyder bara att partiklar som attraherar varandra gärna vill binda ihop om de kan, och om man tar två sådana partiklar mycket långt ifrån varandra (då potentiella energin från attraktionskraften rimligen kan sättas till noll) och låter dem falla mot varandra så får man ut rörelseenergi, alltså måste det gå åt potentiell energi, så den måste minska ned från noll, dvs. bli negativ. Så om man skulle vända grafen upp och ned för att förtydliga att den är negativ så skulle det vara lite lättare att förstå varför alla låga atomnummer "rullar åt höger" mot järn, och alla höga atomnummer "rullar åt vänster" mot järn. Man får alltså ut energi genom att slå *ihop* små atomkärnor, och man får ut energi genom att slå *sönder* stora.

Första steget var alltså att förstå vad grafen visar. Andra steget är att förstå: *varför* ser den ut som den gör? Det är ganska intuitivt, för om man har en liten atomkärna med t.ex. två kärnpartiklar och lägger till en till kärnpartikel så attraherar bägge partiklarna i den ursprungliga kärnan den nya partikeln, och bindningsenergin per partikel blir därför större än om det bara var en kärnpartikel innan som skulle attrahera den nya partikeln. (Det är särskilt uppenbart om det var noll kärnpartiklar innan och man lägger till en, för då var bindningsenergin per partikel innan noll, och nu är den inte noll, så absolutbeloppet av bindningsenergin per kärnpartikel ökar! Men det blir lite spetsfundigt.) Det argumentet antar att avståndet mellan partiklarna är ungefär samma hela tiden, men den starka kärnkraften avtar starkt med avståndet, så när man kommer upp till över järn så blir atomkärnorna så stora att man nu "förlorar" på att lägga till fler, för en partikel på ena sidan av en stor atomkärna attraherar en på andra sidan svagare än för små atomkärnor. (Det här argumentet är lite väl klassiskt, egentligen måste man använda kvantfysik.)

13. ITER-bygget skall vara klart

a. 2021

Det är många steg och milstolpar som skall passeras, och det har redan blivit stora förseningar jämfört med ursprungliga planen, men 2021 skall själva bygget vara klart enligt planen som den är nu.

14. Följande är ett felaktigt påstående om något som är bra med fusion på ITER:

a. väggarna blir inte radioaktiva

Det är en vanlig missuppfattning (delvis understödd av en del populärvetenskapliga beskrivningar av fusion) att väggarna inte blir radioaktiva alls. Det som är bra är att de bara blir radioaktiva med

halveringstid under 100 år. Mänskligheten har nu hanterat sådant avfall från fissions-kraftverk i över ett halvsekel och teknologi för att hantera det är välutvecklad, t.ex. i Sverige av SKB. Om du tycker 100 år låter länge så jämför med halveringstid 211 000 år för [teknium-99](#), som mänskligheten idag producerar tonvis av per år. Sverige har än idag ingen långsiktig beslutad strategi för slutförvar. För att återgå till fusion, man kan också tänka sig andra fusionsprocesser än just deuterium-tritium-fusion (D-T); sådana andra processer kan ge upphov till mindre radioaktivitet. ITER har valt D-T för att den verkar lättast att få igång.

Alternativ c att man kan få ut deuterium och tritium ur vatten är för det första sant i princip. Det är å andra sidan förstås inte sant att man bara tar havsvatten och pumpar in i reaktorn. Deuterium produceras i form av tungt vatten (där man ju inte kan undvika att nämna den [norska TV-serien](#)). Tritiumproduktion är kostsam och tidskrävande, så i ITER-reaktorn skapar man tritium genom en separat process som involverar litium (*breeder blanket*). Hursomhelst tycker jag man ändå kan säga att man får ut tritium från vatten indirekt, dvs. det kommer aldrig en lastbil med tritium till ITER-området, det enda som kommer är deuterium utvunnet ur vatten. (Standardmängden i fusionsprocessen är 0,5 g deuterium/tritium som går åt på cirka en kvart, som du kan räkna på i räkneuppgiften jag också står till tjänst med). Om du inte gillar formuleringen kan du väl sätta rätt för c-alternativet, jag ville bara uppmuntra till tankegångar/diskussion kring vad det betyder att det är *vatten* som är huvudingrediens i ITER – vatten är ju åtminstone en väldigt lockande idé jämfört med uran, och helium är trevligare än plutonium.