

Neutrinoerne blev ikke enden på Lotto



Foto: OPERA-eksperimentet

Det vakte stor opsigt, da et internationalt forskerhold sidste år annoncerede, at de havde observeret neutrinoer, der bevægede sig hurtigere end lyset.

Det har nu vist sig, at der var tale om en målefejl. Vi ser her på eksperimentet og hvorfor overlys-neutrinoer er så opsigtsvækkende.

Af Tobias Basse

■ Essensen af Einsteins specielle relativitetsteori er, at to observatører, der bevæger sig i forhold til hinanden med en konstant fart, vil måle den samme værdi for lysets fart i vakuum. Lysets fart i vakuum er defineret til at være 299.792.458 meter per sekund. I relativitetsteori opfattes lysets fart som en øvre grænse for fart, dvs. det ikke er muligt for massive partikler at bevæge sig med en højere fart. Det vakte derfor

opsigt, da en international forskergruppe i 2011 præsenterede resultatet af OPERA-eksperimentet ved Gran Sasso i Italien, som viste, at en partikel kaldet myonneutrinoen bevæger sig hurtigere end lyset. Resultatet ville have paradoksale konsekvenser, f.eks. muligheden for at sende information tilbage i tiden, hvorfor forskere verden over reagerede med sund skepsis.

For nylig annoncerede forskerne så, at resultaterne skyld-

tes en målefejl. Selvom sagen nu kan anses for afgjort, er historien alligevel interessant, fordi resultatet ville have nogle opsigtsvækkende konsekvenser, og fordi forskergruppens håndtering af sagen viser, hvordan videnskaben bør fungere.

Overlyspartikler er teoretisk mulige

For en god ordens skyld skal det pointeres, at matematikken bag den specielle relativitetsteori ikke forbyder partikler,

som bevæger sig hurtigere end lyset. Sådanne teoretisk mulige partikler med overlyshastighed kaldes tachyoner. Historisk set findes der flere eksempler på, at matematikken har forudsagt eksistensen af fysiske fænomener, der senere har vist sig korrekte, f.eks. Diracs forudsigelse af eksistensen af antipartikler. Tachyoner er altså i teorien mulige, men deres eksistens vil muligvis kræve en ændring i

← OPERA-detektoren i San Grasso Laboratoriet. Detektoren er opbygget af 150.000 "mursten" bestående af vekslende lag af fotografisk film og bly. Den fotografiske film fanger spor af de ladede partikler, der dannes, når neutrinoerne vekselvirker med blyet.

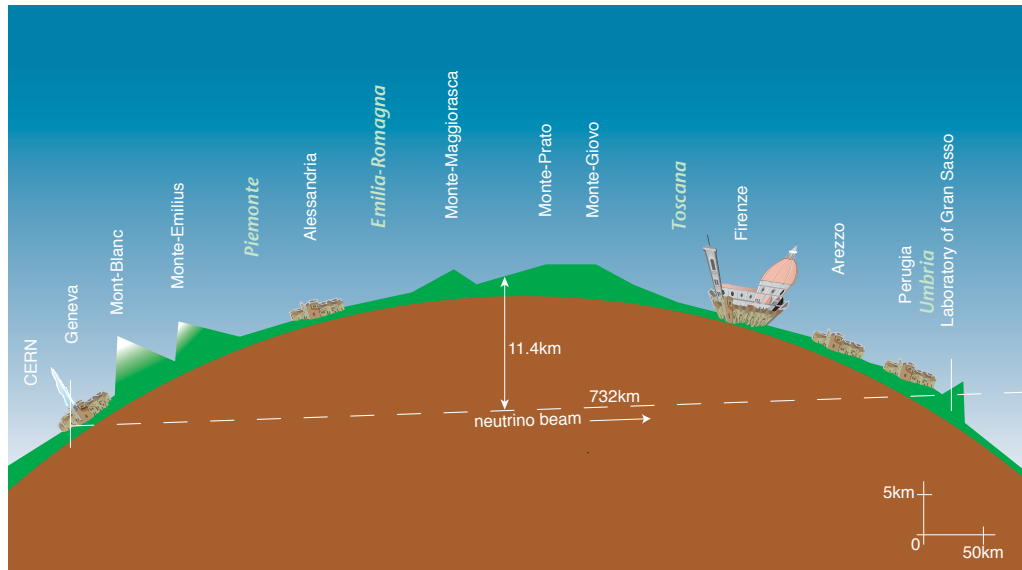
vores opfattelse af rækkefølgen mellem årsag og virkning, eller en omdefinering af hvad de to begreber betyder.

Utallige neutrinoer

Forskernes eksperiment er et såkaldt flyvetidseksperiment, dvs. man måler hvor lang tid neutrinoerne bruger på at tilbagelægge afstanden mellem de to laboratorier, der er en del af eksperimentet. Det drejer sig om det fælleseuropæiske CERN laboratorium på grænsen mellem Schweiz og Frankrig og det nationale laboratorium i Gran Sasso, Italien.

Neutrinoer reagerer næsten ikke med almindeligt stof som f.eks. jern, kulstof eller lignende. Hvis man prøver at stoppe neutrinoer med bly, skal man i gennemsnit have en klods, der er tykkere end et lysår. Neutrinoerne behøver derfor ikke tage motorvejen fra CERN til Gran Sasso. De passerer uhindret direkte gennem jordens skorpe i en retlinet bevægelse, uden at lægge mærke til severdighederne undervejs.

Neutrinoernes manglende vilje til at reagere udgør et problem for forskerne, da målingen af neutrinoens fart involverer en bestemmelse af det tidspunkt, hvor neutrinoerne kommer frem til Gran Sasso laboratoriet. Ankomsttidspunktet for neutrinoen bestemmes ved, at neutrinoen vekselvirker i laboratoriets detektor. Det er ikke muligt at tvinge neutrinoerne til at vekselvirke, så forskerne afsender et utroligt højt antal neutrinoer, ca. $2,4 \times 10^{13}$ neutrinoer flere gange om dagen, i håbet om, at nogle få af dem vil fanges i detektoren. Detektoren fanger ca. 30 neutrinoer i løbet af en dag.



I OPERA-eksperimentet er det afgørende at kende den præcise afstand, som neutrinoerne tilbagelægger mellem de to laboratorier i hhv. CERN og San Grasso. Denne afstand er bestemt ved en kombination af GPS-referencepunkter på jordens overflade og landopmålinger, der relaterer disse referencepunkter til andre referencepunkter i de to laboratorier. GPS-modtagerne til bestemmelse af GPS-referencepunkterne er så utroligt følsomme, at de i 2009 detekterede et jordskælv i Gran Sasso området, der flyttede laboratoriet med 7 cm. Endnu mere forbløffende er det, at de er følsomme nok til at registrere bevægelse af den europæiske kontinentplade på ca. 1 cm om året.

Neutrinoerne produceres på CERN ved at beskyde en række stave af kulstof med energirige protoner, hvorved der dannes positivt ladede ustabile partikler kaldet kaoner og pioner. De ladede partikler fokuseres af magnetfelter, så de flyver mod Gran Sasso. De ustabile partikler vil efterfølgende henfalde til myoner og de myon-neutrinoer, der bruges i eksperimentet. Energi- og impulsbevarelse sikrer, at neutrinoerne også vil flyve mod Gran Sasso.

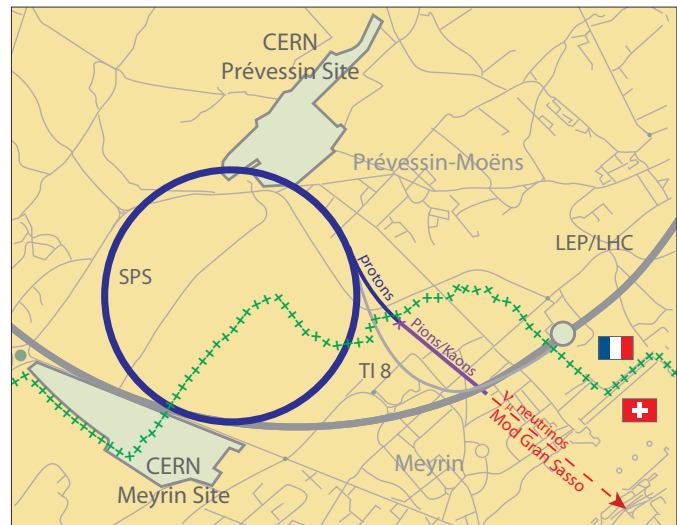


Illustration: CERN

Tidtagning med høj præcision

Resultatet af eksperimentet kvantificeres ved en størrelse, δt , der er forskellen mellem den tid det vil tage en partikel med lysets fart at tilbagelægge afstanden direkte gennem jordens skorpe fra CERN til Gran Sasso og så den tid, rejsen faktisk tager for neutrinoerne. Husk på, at lysets fart er en definition, dvs. flyvetiden for en partikel med lysets fart afgøres ved en

måling af afstanden og ikke ved at sende lys fra CERN til Gran Sasso. En positiv værdi af δt svarer altså til, at neutrinoerne ankommer tidligere, end de ville gøre, hvis de bevægede sig med lysets fart.

Afstanden mellem de to laboratorier er målt ved en kombination af målinger med GPS og afstandsmålinger på jorden. GPS-referencepunkterne til afstandsmålingen er defineret i et tredimensionelt koordinat-

system med begyndelsepunkt i jordens tyngdepunkt. Koordinatsystemet følger med jordens rotation. Den målte afstand er 731 kilometer og 278 meter med en præcision på 20 centimeter, svarende til en rejsetid for en partikel med lysets hastighed på 2,44 millisekund med bedre end nanosekund-præcision. I dette tidsrum har jorden roteret en lille vinkel, hvilket gør den faktiske afstand, som neutrinoernes fart måles over, ca. 66

Neutrinoer

En neutrino er en elektrisk neutral, svagt vekselvirkende elementarpartikel i partikelfysikkens standardmodel. Alt tyder på, at neutrinoer har masse, men at deres masse er lille selv efter standarderne for subatomare partikler.

Neutrinoer bærer ikke elektrisk ladning, hvilket betyder, at de ikke påvirkes af de elektromagnetiske kræfter, der virker på ladede partikler, såsom elektroner og protoner. Neutrinoer er kun påvirket af den svage subatomare kraft, der har en meget kortere rækkevidde end den elektromagnetiske kraft og tyngdekraften – sidstnævnte er yderst svag på den subatomare skala. De er derfor i stand til at bevæge sig over store afstande gennem stof uden at blive påvirket af det.

Neutrinoer skabes gennem visse typer radioaktive henfald, eller gennem kernereaktioner som dem, der finder sted i solen, i kernereaktorer og når kosmiske stråler rammer atomer. Der er tre typer neutrinoer: elektronneutrinoer, myonneutrinoer og tauneutrinoer. Hver type har også en tilsvarende antipartikel, kaldet en antineutrino.

De fleste neutrinoer, som passerer gennem Jorden stammer fra Solen. Omkring 65 milliarder solneutrinoer per sekund passerer gennem hver kvadratcentimeter på jorden vinkelret på retningen af Solen. Således passerer du af ca. en billion neutrinoer per sekund, men kun én kan forventes at lave en reaktion i kroppen i løbet af din levetid.



En enkelt "mursten" i OPERA-detektoren vejer ca. 8 kg, og består af 57 fotografiske film og 56 lag af bly.

cm længere, end afstanden målt med GPS. Denne effekt kaldes Sagnac-effekten og blev faktisk opdaget før relativitetsteorien.

Rejsetiden for neutrinoerne bestemmes ved en simpel tids-tagning med et meget avanceret stopur. Tidstagningen ved de to laboratorier er synkroniseret til utrolig høj præcision med GPS. Tidstagningen kræver kendskab til alle forsinkelser i de elektroniske kredsløb i laboratorierne. Disse forsinkelser måles meget præcist ved at sende et signal frem og tilbage gennem alle ledninger i opsætningen.

Overraskende resultat

Resultatet af det oprindelige eksperiment blev en værdi for δt på 57,8 nanosekunder. Det betød, at neutrinoerne ankom til detektoren 57,8 nanosekunder tidligere, end de ville gøre, hvis de bevægede sig med lysets fart i vakuum. Usikkerhederne på resultatet var så små, at forskerne med mere end 99,9 % sikkerhed kunne sige, at δt måtte være positiv, og at neutrinoerne havde bevæget sig hurtigere end lysets fart. Forskerne var dog meget bevidste om, at resultatet kunne være forårsaget af en ukendt systematisk fejl i eksperimentet. Men da de umiddelbart ikke kunne identificere en sådan fejl valgte de at fremlægge deres resultat for offentligheden i håb om hjælp til at finde systematiske effekter i deres eksperiment eller analyse, der kunne forklare resultatet. I forbindelse med offentliggørelsen af det overraskende resultat den 23. september 2011 udtalte CERNs forskningsdirektør:

»Når et eksperiment finder et resultat der forekommer utroligt, og ikke kan finde fejl i målingen der kan forklare det, er det normal procedure at åbne for bred undersøgelse, og det er præcist hvad OPERA-kollaborationen gør, i henhold til god videnskabelig praksis. Hvis denne måling bekræftes, kunne det ændre vores syn på fysikken, men vi er nødt til at være helt sikre på at der ikke er andre, mere jordbundne, forklaringer. Dette kræver uafhængige målinger.«

Overlyshastighed og Lotto

Men hvad er det, der er så opsigtsvækkende ved overlyshastigheder? Hvis partikler kan bevæge sig hurtigere end lyset kan man i princippet kommunikere med overlyshastighed. Og en paradoksal konsekvens ved dette, er at det dermed i princippet er muligt at sende information tilbage i tiden, f.eks. ugens lottotal. Det skal indrømmes med det samme, at opgaven ikke er nem og kræver en del teknisk snilde og overtalessevne. Du får brug for at bygge et rumskib, der kan opnå hastigheder, som er sammenlignelige med lysets fart (dog ikke højere). Dernæst skal du overtale en assistent til at forlade jorden i dit rumskib (her kan størrelsen på lottopuljen måske hjælpe). Når disse indledende øvelser er overstået, er du klar til at sikre dig jackpotten.

Ideen er simpel men effektiv. Du sender nu et signal, der indeholder ugens lottotal, med overlyshastighed til rumskibet, som er på vej væk fra jorden med høj fart (mindre end lysets fart). Når assistenten modtager signalet sender han/hun straks et signal med den samme information tilbage med endnu højere hastighed. Pointen er nu, at du kan modtage signalet fra rumskibet inden, du udsender det oprindelige signal. Tilpasses farten af signaler og rumskibet, kan du altså modtage lottotallene, før de trækkes og på den måde sikre dig jackpotten.

Begivenhedernes rækkefølge

Effekten opstår, fordi du og assistenten i rumskibet er i bevægelse i forhold til hinanden. I relativitetsteori-sprog befinder I jer i hvile i to forskellige inertialsystemer (inertialsystemer er blot to koordinatsystemer, som bevæger sig med konstant fart og retning i forhold til hinanden). En begivenhed i relativitetsteori er beskrevet ved en position og et tidspunkt. Begivenheden, at signalet modtages af assistenten, er beskrevet ved rumskibets position og tids-



Foto: CERN

Interessen var stor, da den videnskabelige koordinator for OPERA-eksperimentet, Dario Autiero, præsenterede de opsigtsvækkende målinger af overlysneutrinoer på et seminar på CERN den 23. september 2011.

punktet, hvor signalet modtages. Rumskibets position og – i relativitetsteori – også tidspunktet afhænger af, i hvilket inertialsystem man ønsker at vide det. Hvordan position og tid ændrer sig, når man skifter inertialsystem er beskrevet ved et sæt af ligninger kaldet Lorentz-transformationerne.

Rækkefølgen af begivenheder, der er forbundet af overlyshastighed, som f.eks. afsendelsen af det oprindelige signal og modtagelsen af signalet i rumskibet, kan afhænge af, i hvilket inertialsystem begivenhederne observeres.

Disse effekter strider mod de flestes intuition og fører altså til, at signalet fra rumskibet modtages før det oprindelige signal udsendes.

Neutrinoer der mister pusten

En anden konsekvens af neutrinoerne, der kan bevæge sig hurtigere end lysets fart, er, at de spontant, dvs. uden at vekselvirke med andre partikler, kan udsende energirige partikler, f.eks. en elektron og dens antipartikel, positronen. Ved denne spontane partikeludsendelse mister neutrinoen en stor del af sin energi. Jo længere tid

neutrinoerne bevæger sig, desto mere energi vil de miste – lidt ligesom de fleste må forvente at løbe tør for energi i løbet af et maratonløb. Men forskerne ser ikke, at neutrinoerne løber tør for energi. Så hvis resultatet havde vist sig at holde vand, skulle teoretiske fysikere grave dybt efter en løsning, hvor denne effekt ikke optræder.

Den løse ledning

Efter at forskerne var gået ud i offentligheden med deres kontroversielle resultater fortsatte de deres jagt på mulige fejlkilder. Og der gik ikke længe før de fandt en fejl i form af et løst kabel i Gran Sasso laboratoriet, der i princippet kunne gøre den målte værdi af tidsforskellen større end den i virkeligheden var. Hvis ledningen havde siddet løs under eksperimentet, ville det resultere i en værdi for den målte flyvetid, der er for lav og dermed en højere fart af partiklerne end i virkeligheden. Da denne fejlkilde blev elimineret og forsøget gentaget, kunne forskerne i starten af juni måned rapportere målinger af neutrinoernes flyvetid, der præcist svarede til lysets hastighed. Fysikernes verdensbillede er dermed opretholdt - i hvert fald i denne omgang.

Sundt med debat om resultater

I kølvandet på forskernes offentliggørelse af deres resultater, har der været kritik af, at de har været lige lovligt hurtige med at lægge deres resultater frem. Også internt blandt forskerne i OPERA-eksperimentet har der været uenighed om fremgangsmåden, hvilket blandt andet har ført til en afstemning om en "mistillids-erklæring" til eksperimentets talsperson Antonio Ereditato og den videnskabelige koordinator Dario Autiero. Mistillids-erklæringen blev dog ikke vedtaget af de godt 30 videnskabelige grupeledere, men betød alligevel at begge efterfølgende har fratrukket deres poster.

I virkeligheden har de ansvarlige i mine øjne gjort det eneste rigtige. De har analyseret deres resultater på videnskabelig vis, og da de – på trods af egen skepsis overfor resultatet – ikke kunne finde nogen fejl, valgte de at gå offentligt ud med resultaterne i deres søgen på en forklaring. Videnskabsfolk må ikke være bange for at stille spørgsmål ved vores teoretiske standpunkt, da denne frygt kun vil hindre videnskabelige fremskridt. ■

Om forfatteren



Tobias Basse er ph.d.-studerende ved Institut for Fysik og Astronomi Aarhus Universitet basse@phys.au.dk

Videre læsning

Steen Hannestad: *Universet – fra superstrengte til stjerner*. Aarhus Universitetsforlag 2003.

Ulrik Uggerhøj: *Tid – den relative virkelighed*. Aarhus Universitetsforlag 2006.

Om Opera-eksperimentet: <http://operaweb.lngs.infn.it/>