

Absolut hastighedsgrænse for kosmiske protoner – Når standardmodellen møder kosmologien

Bernhard Lind Schistad, Midtbyens Gymnasium, Mercantec

En konsekvens af den specielle relativitetsteori er, at ingen partikler kan overstige lyshastigheden, og at partikler med masse aldrig kan nå helt op på lyshastigheden. Men det viser sig, at for protoner gælder en lavere hastighedsgrænse, som skyldes vekselvirkning med den kosmiske baggrundsstråling. Denne hastighedsgrænse kan ovenikøbet observeres i den kosmiske stråling, der rammer jorden. Ophavet til fartgrænsen er den såkaldte Greisen–Zatsepin–Kuzmin-effekt. Vi vil her se på, hvad der forårsager denne effekt, og hvad konsekvenserne er for kosmisk stråling.

Hastighed i relativitetsteorien

Før vi ser på hvad der er specifikt for protonen, vil vi lige beskrive hastighed i den specielle relativitetsteori. I denne teori vil den totale energi for en partikel med hvilemasse m_0 være givet ved:

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}, \quad (1)$$

hvor p er partiklens impuls og c er lyshastigheden.

Sammenhængen mellem impuls og hastighed er:

$$p = \gamma m_0 v, \quad (2)$$

hvor v er hastigheden og

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3)$$

er Lorentzfaktoren.

Når vi sætter dette ind i udtrykket for energien og løser med hensyn på hastigheden, får vi:

$$v = c \sqrt{1 - \frac{m_0^2 c^4}{E^2}} \quad (4)$$

For en partikel i hvile giver dette $v = 0$, mens hastigheden går asymptotisk mod c , når energien går mod uendelig. Partiklen kan nå vilkårligt tæt på lyshastigheden, men kan aldrig nå helt derop.

Tilsvarende er hastigheden altid lig lyshastigheden, hvis hvilemassen er nul.

Den kosmiske mikrobølge baggrund

Hele universet er fyldt med mikrobølgestråling, som stammer fra Big Bang. Denne stråling blev udsendt, da universet blev gennemsigtig og temperaturen var faldet til 3000 K, ca. 380.000 år efter Big Bang. På grund af universets udvidelse er temperaturen nu faldet, så strålingen i dag svarer til sort hulrumsstråling fra et objekt med en temperatur på 2,72 K.

Det er karakteristisk for denne stråling, at den er isotrop i alle retninger. På grund af denne egenskab, fungerer den som et slags referencesystem. Hvis en observatør bevæger sig med stor hastighed i forhold til dette system, vil han observere, at bølgelængden

i bevægelsesretningen vil blive ændret på grund af relativistisk dopplerskift.

Relativistisk dopplerskift

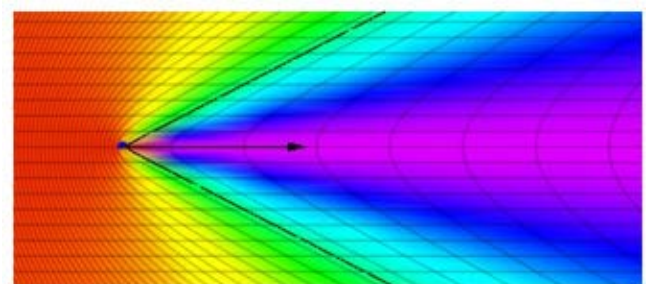
Når en observatør bevæger sig i forhold til en lyskilde med stor hastighed, vil han observere, at lysets bølgelængde i bevægelsesretningen bliver forkortet, mens bølgelængden forlænges i den modsatte retning. Dette kaldes dopplereffekten. Vi kan høre en tilsvarende effekt for lyden i et tog, når toget passerer en jernbaneovergang med akustisk signal.

For meget høje hastigheder gælder den relativistiske formel for dopplerskift af frekvensen:

$$f_r = \gamma (1 - \beta \cos \theta_s) f_s \quad (5)$$

Her er $\beta = \frac{v}{c}$, f_s er frekvensen af lyset i lyskildens referencesystem og θ_s er vinklen i forhold til bevægelsesretningen.

Effekten ved en hastighed på $0,86 c$ er vist på figur 1. Her ser vi, hvorledes farven på gult lys fra en stationær lyskilde ændres i forskellige retninger for en observatør, der bevæger sig med $0,89\%$ af lyshastigheden.



Figur 1. Relativistisk dopplerskifte for en observatør, der bevæger sig med $0,89\%$ af lyshastigheden.

Sort hulrumsstråling fra et objekt med en temperatur på 2,72 K har en gennemsnitlig bølgelængde på $\lambda_s = 1,9$ mm. Men på grund af dopplereffekten vil en proton, som bevæger sig med $99,998\%$ af lyshastigheden, opleve kosmisk mikrobølgestråling i bevægelsesretningen med en bølgelængde på $19 \mu\text{m}$. Dette svarer til en fotonenergi på $0,065 \text{ eV}/c^2$. Dette har ingen virkning på protonen, som har en masseenergi på $938 \text{ MeV}/c^2$.

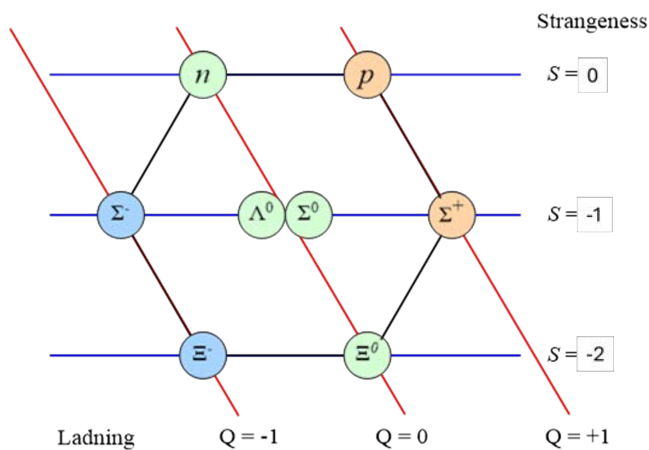
Hastighedsgrænsen for protonen

Vi vil nu undersøge hvad der sker med baggrundsstrålingen ved ekstremt høje hastigheder. Vi starter med protonerne i LHC, som er verdens største protonaccelerator. Her opnår protonerne en energi på $7 \text{ TeV}/c^2$. Dette giver en hastighed på $99,9999991\%$ af lyshastigheden.

Protonerne i LHC bevæger sig i et metalrør, som danner et Faradaybur, men store dele af LHC selv er kølet ned til lave temperaturer på grund af de superledende magneter (som er kølet med flydende helium). Vi regner derfor for nemheds skyld med, at mikrobølgebaggrunden i LHC er den samme som i resten af universet.

Protonerne i LHC vil derfor se en mikrobølgebaggrund med en bølgelængde på $8,5 \text{ pm}$ og en fotonenergi på $146 \text{ keV}/c^2$. Dette vil kun have en minimal virkning på protonerne, da deres energi er otte størrelsesordener højere.

Men kan vi forestille os, at fotonenergien kunne blive så høj, at der sker noget med protonen? For at svare på dette, vil vi se lidt på, hvad der eventuelt kunne ske med en proton. Protonen er en baryon med halvtalligt spinkvantetal ($s = \frac{1}{2}$). Den består af tre kvarker, to u -kvarker og en d -kvark. Men der findes flere andre baryoner med samme spin. Sammen med neutronen danner de en oktet (figur 2).



Figur 2. Baryonoktetten med halvtalligt spin.

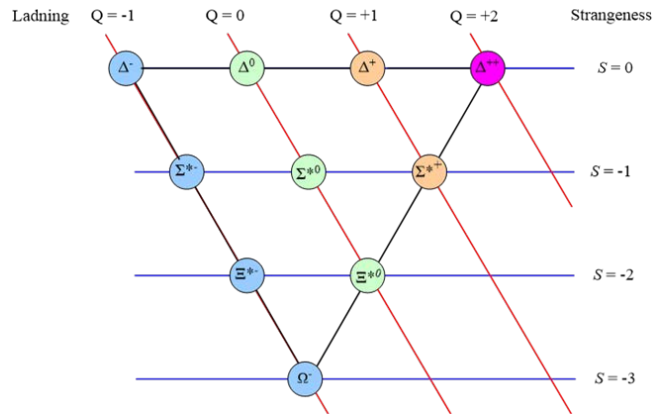
Alle baryonerne i oktetten består af tre kvarker. Men alle de andre indeholder en eller to s -kvarker og har derfor kvantetallet strangeness ($S \neq 0$). Der findes i øvrigt også baryoner med kvarkerne fra andre familier, men deres masse er for stor til, at de kan spille nogen rolle her.

Protonen har spin $S = \frac{1}{2}$, som er det samme som kvarkerne. Det vil sige, at to kvarker må have spin i samme retning, mens den tredje kvark har modsat rettet spin. På grund af Paulis eksklusionsprincip må to identiske partikler ikke have samme kvantetilstand. Det medfører, at de to u -kvarker i protonen altid har modsat rettede spin, men d -kvarken kan have spin op eller spin ned. Vi her derfor to mulige spintilstande for protonen, nemlig $(\uparrow\downarrow\uparrow)$ og $(\downarrow\uparrow\downarrow)$.

Når en proton rammes af en højenergetisk foton, vil den kunne ændre sin kvantetilstand, men den elektromagnetiske vekselvirkning kan ikke ændre en

kvark til en anden type. Den eneste mulige ændring vil være enten at flytte en kvark til et højere energiniveau eller ændre dens spintilstand.

Vi vil derfor se, om der findes en anden baryon med samme kvarksammensætning som protonen, men med et andet spinkvantetal. Det viser sig, at der også findes baryoner med spinkvantetal $S = \frac{3}{2}$. De danner en decet – en gruppe på ti medlemmer –, som er vist i figur 3.



Figur 3. Baryondecetten.

Alle baryonerne i denne decet er ustabile og henfalder til andre baryoner og mesoner. Da elektrisk ladning og strangeness er bevaret, er der kun en baryon i denne decet, som protonen kan forvandles til ved at absorbere en foton. Dette er Δ^+ (delta-plus)-baryonen, som også består af to u -kvarker og en d -kvark. Da Δ^+ -baryonen har $S = \frac{3}{2}$, må alle tre kvarker have samme spintilstand. Der er derfor to muligheder, nemlig $(\uparrow\uparrow\uparrow)$ og $(\downarrow\downarrow\downarrow)$. Men da de to u -kvarker ikke kan være i samme kvantetilstand, må den ene være i et højere energiniveau. Δ^+ har derfor en højere masse end protonen, nemlig $1232 \text{ MeV}/c^2$.

Deltabaryonen er ustabil og henfalder til en proton og en neutral pi-meson, eller en neutron og en positiv pi-meson:

$$\Delta^+ \rightarrow p + \pi^0 \quad (6)$$

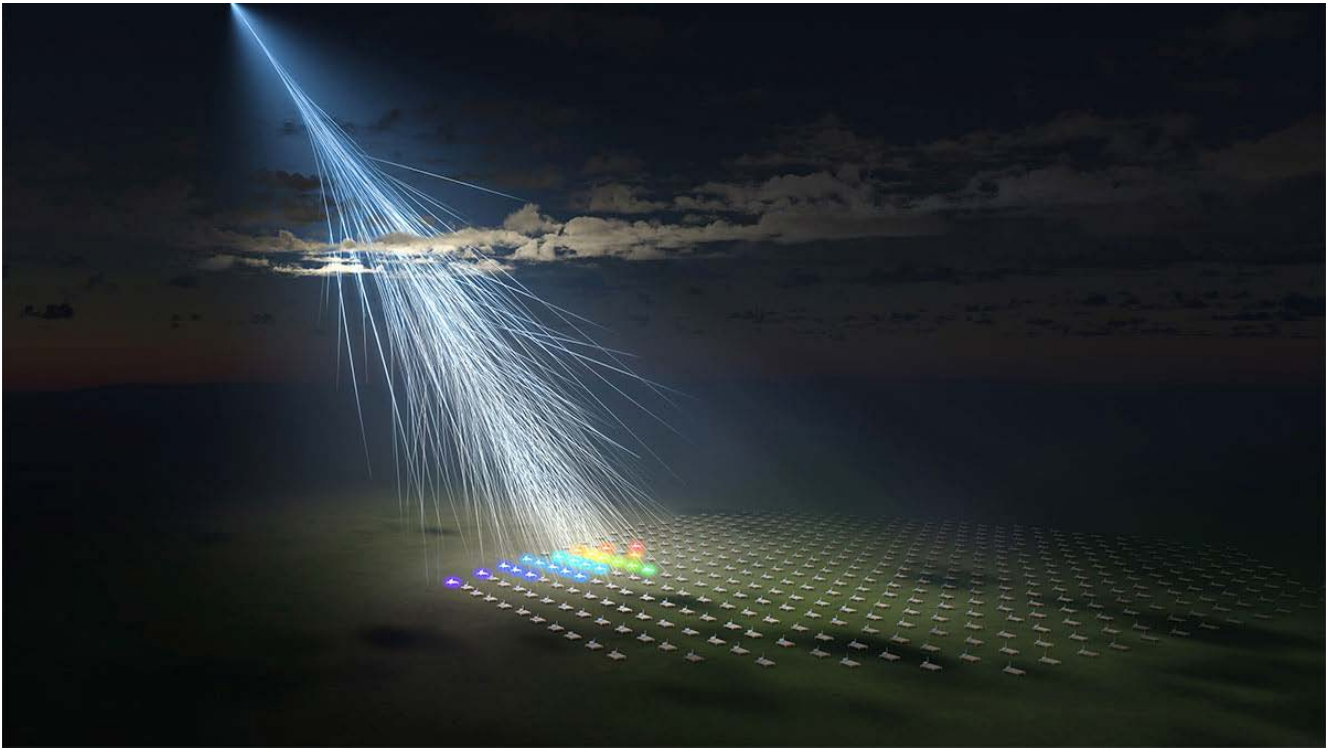
$$\Delta^+ \rightarrow n + \pi^+ \quad (7)$$

Dens gennemsnitlige levetid er $5 \cdot 10^{-24} \text{ s}$.

Da fotonen har spin $S = 1$ vil en proton, som absorberer en foton med energi lig med massedifferencen mellem protonen og deltabaryonen, få vendt spindet på den ene u -kvark, så de alle har samme spinkvantetal, men den ene u -kvark vil i et kort øjeblik være i en højere energitilstand. Derefter vil deltabaryonen henfalde til en proton eller neutron med lavere energi end den oprindelige proton havde.

Denne effekt medfører, at en proton i praksis aldrig kan accelereres til højere hastighed end den hastighed, hvor mikrobølgebaggrundsstrålingen med dopplerskift når massedifferencen mellem protonen og deltabaryonen. Denne grænse kaldes Greisen-Zatsepin-Kuzmin-grænsen.

Vi vil nu prøve at finde hvor denne grænse ligger. Massedifferencen mellem deltabaryonen og protonen er $294 \text{ MeV}/c^2$. Dette svarer til en foton med bølgelængden $\lambda_r = 4,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ ($4,2 \text{ fm}$ er ca. fire protondiameter). For at en foton fra den kosmiske mikrobølge



Figur 5. Byge af sekundærpartikler fra højenergetisk proton.

Denne partikelstråling består hovedsagelig af protoner (80%), men også alfapartikler (16%) og en substantiel andel af tungere kerner. Forholdet mellem de forskellige partikeltyper viser sig at svare til det, vi ser i Solen og andre stjerner. Dette antyder, at ophavet til strålingen må være kollaps af stjerner ved for eksempel en supernova. Desværre er det umuligt at retningsbestemme strålingen, da vores galakse her et magnetfelt af størrelsesorden 10^{-11} T, som vil afbøje elektrisk ladede partikler selv ved disse høje energier, da krumningsradius for en proton med energi 10^5 GeV/c² vil være ca. 10 lysår.

Når vi sammenligner fluksen af de højenergetiske protoner med hyppigheden af supernovaeksplosioner (ca. 1 hver 50 år i en galakse som vores), ser det ud til, at hovedparten af disse partikler kommer fra supernovaer [5].

Ved energier over 10^{17} eV/c² er fluksen af protoner så lav, at vi ikke kan detektere dem med en partikeldetektor. Men vi kan observere den kaskade af sekundærpartikler, som skabes, når protonen rammer atomkerner (nitrogen eller oxygen) i atmosfæren.

Dette vil give ophav til en kaskade med op til 10 milliarder sekundærpartikler over en afstand på nogle kilometer (figur 5). Denne byge vil bevæge sig som en pandekage af elektrisk ladede partikler, nogle hundrede meter bred og få meter dyb.

Når denne byge bevæger sig gennem atmosfæren, vil den eksitere luftmolekylerne. Når de falder tilbage til grundtilstanden, vil de udsende lys med bølglængde i området 300–400 nm. Lyset udsendes næsten udelukkende fra nitrogenatomer. Hver elektrisk ladet partikel vil give ophav til 4–5 fotoner per meter. Dette giver en stor mængde lys, som kan detekteres ved jordoverfladen.

For at observere dette lys, anvender man store

sfæriske spejle, som fokuserer lyset på et “insekt øje” bestående af fotomultiplikatorrør, som er følsomme for ultraviolet lys. Når et rør rammes af en foton, vil det give ophav til en elektrisk puls. Ved at summere signalerne fra alle detektorer, kan man måle antal fotoner og dermed den totale energi i partikkelkaskaden [3].

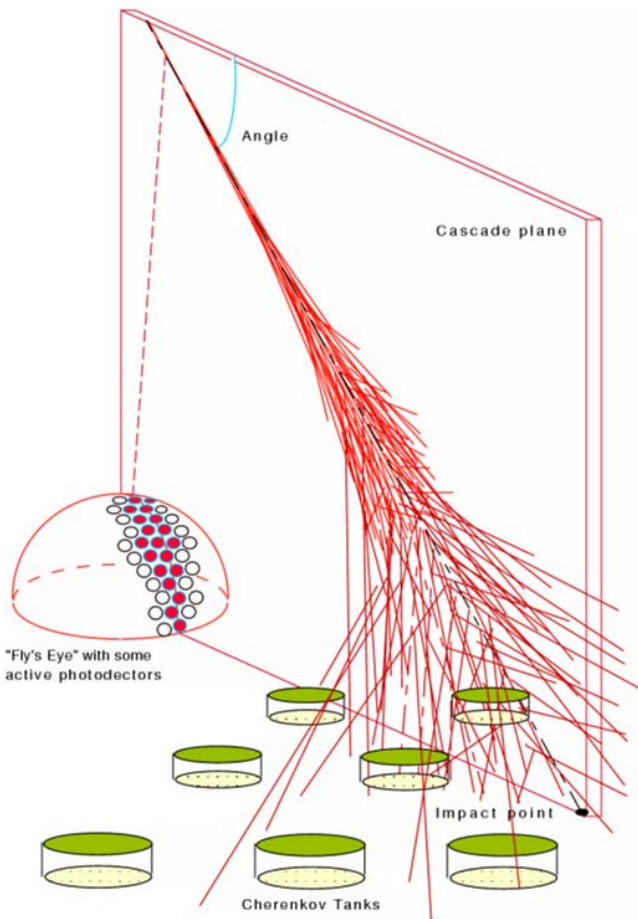


Figur 6. Fly's Eye-deketoren i Utah.

High Resolution Fly's Eye-dektoren [6] er bygget til at observere lyset fra sådanne byger af sekundærpartikler. Det ligger i ørkenen i Utah og optog data i perioden 1997 til 2006. Detektoren består af et stort antal sfæriske spejle, som fokuserer lyset på et kamera, som består af 256 pixler med fotomultiplikatorrør (figur 6). Disse rør kan detektere en enkelt foton med bølglængde i området 300–400 nm. Signalerne fra samtlige kameraer summeres, og dette signal er proportionalt med energien af den indkommende proton.

En anden detektor for højenergetiske protoner er Pierre Auger-observatoriet, som ligger på Amarilla-

pampassen i Argentina. Den består af to detektorsystemer. Lys fra partikelkaskaden opfanges med spejle og fotomultiplikatorer, men i tillæg detekteres elektrisk ladede partikler i kaskaden direkte i store vandtanke (figur 7). Når elektrisk ladede partikler rammer vandet, udløser de Cherenkovlys, som detekteres med fotomultiplikatorer. Signalerne fra begge detektor typer kombineres, og man kan måle energien i partikelkaskaden.



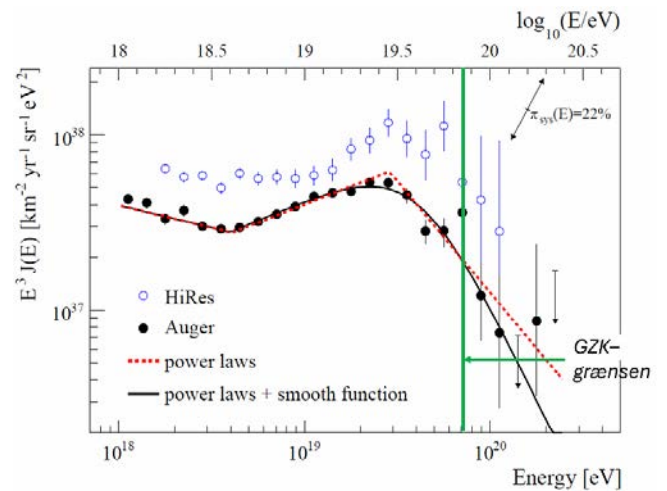
Figur 7. Pierre Auger-detekteren.

Resultaterne fra de to detektorer [8] er vist i figur 8. Her har vi logaritmen til energien (i elektronvolt) på x-aksen og energifluxen på y-aksen. De sorte målepunkter kommer fra Augerdetektoren, mens de blå kommer fra Fly's Eyedetektoren. Greisen-Zatsepin-Kuzmin-grænsen er markeret med grønt. Som vi ser, knækker energispektret ved denne grænse, og når vi tager højde for måleusikkerheden, er der ingen protoner med energi højere end $4,7 \cdot 10^{19} \text{ eV}/c^2$

Konklusion

Når protoner når hastigheder, der giver en gammafaktor $\gamma = 5,01 \cdot 10^{10}$, vil den kosmiske mikrobølgebaggrund, på grund af relativistisk dopplerskifte, have en energi (set fra protonens referencesystem), som er høj nok til at flippe spin på en af u -kvarkerne, og dermed forvandle protonen til en deltabaryon. Denne er ustabil og vil straks henfalde til en proton eller neutron og en pi-meson. Dermed vil protonen tabe den energi, der blev tilført ved acceleration over hastighedsgrænsen. Dette betyder,

at det ikke er lyshastigheden, men derimod Greisen-Zatsepin-Kuzmin-(GZK)-grænsen, som er den yderste hastighedsgrænse for protoner. Dette kan observeres i energispektret for kosmiske protoner.



Figur 8. Energispektrum af kosmiske protoner.

Litteratur

- [1] K. Greisen (1966) "End to the cosmic-ray spectrum?", *Physical Review Letters*, bind **16**, side 748–750.
- [2] G.T. Zatsepin og V.A. Kuz'min(1966) "Upper limit of the spectrum of cosmic rays", *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, bind **4**, side 78–80.
- [3] R.U. Abbasi m.fl. (High Resolution Fly's Eye Collaboration) (2008) "First Observation of the GreisenZatsepin-Kuzmin Suppression", *Physical Review Letters*, bind **100**, side 101101.
- [4] P. Blasi (2013) "The Origin of Galactic Cosmic Rays", *Nuclear Physics B – Proceedings Supplements Volumes*, bind **239-240**, side 140–147.
- [5] T.W. Donnelly m.fl. (2017) "Foundations of Nuclear and Particle Physics", side 575, Cambridge University Press.
- [6] J. N. Matthews (2001) "Description of the High Resolution Fly's Eye Detector", *Proceedings of ICRC*, side 350.
- [7] A.A. Watson, "The Pierre Auger Observatory - why and how", CERN Document Server, cds.cern.ch/record/1017825/files/p191.pdf.
- [8] D. Veberic (2011) "The end of the cosmic ray spectrum", *Il Nuovo Cimento*, bind **C 34**, side 85–92.



Bernhard Lind Schistad er cand.real. fra Universitetet i Oslo. Han har været forsker i partikelfysik ved Niels Bohr Institutet og CERN og senere arbejdet med udvikling af grafiske systemer og radar. Han underviser i fysik og matematik på Midtbyens Gymnasium, Mercantec, i Viborg.