

Øvelse 2: Myonens levetid

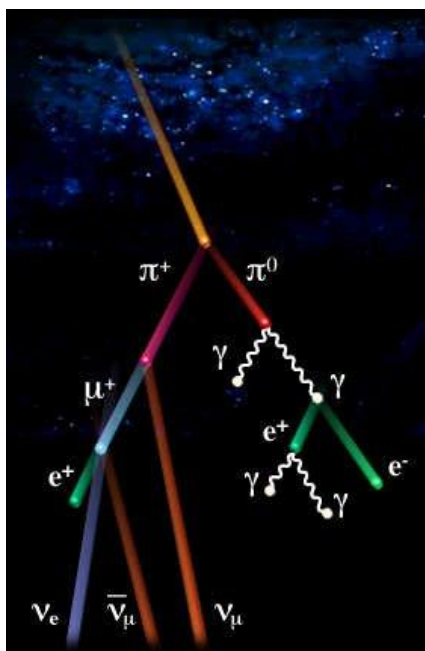
Det er en almindelig opfattelse at rigtigheden af relativitetsteorien nødvendigvis er vanskelig at eftervise eksperimentelt. Det er den faktisk ikke. Et lille eksperiment (og, det må indrømmes, en



tillid til et par udsagn om levetid og sammensætning af den kosmiske stråling) kan let eftervise at Einstein havde ret i ihvertfald to ting: Et ur i bevægelse går langsomt og dets udstrækning formindskes.

En myon er en tung udgave af en elektron – den har samme ladning, men vejer meget mere og den er derfor radioaktivt ustabil, dvs. den henfalder til en elektron (og nogle flere, i denne forbindelse irrelevante, partikler kaldet neutrinoer, ν). Dens levetid i hvile er 2.2 mikrosekunder (μs). Denne slags partikler bliver dannet i relativt store højder i Jordens atmosfære, omkring 10 km oppe. De bliver dannet med så høj energi at de bevæger sig med en fart meget nær lysets, dvs. ca. 300.000 km/s

eller 0.3 km/ μs . Hvis deres levetid *i bevægelse* var identisk med deres levetid *i hvile* ville de således nå knapt en kilometer fra produktionsstedet, dvs. de ville aldrig nå frem til en tæller placeret ved jordoverfladen. Med en almindelig Geiger-tæller kan man høre kliklyde forårsaget af ladede partikler, dels fra omgivelsernes radioaktivitet, dels fra den kosmiske stråling. Cirka 25% af disse klik stammer fra kosmisk stråling, hovedsageligt fra myoner der løber gennem tælleren. Alternativt kan man afbilde myonens spor i et gnistkammer som vist på figuren. Hvordan kan det lade sig gøre at observere myoner når de er produceret i en højde af 10 km? Det kan det fordi myonen bliver relativistisk, dvs. dens bevægelsesenergi, E_{kin} , overstiger 'hvilemassens energi' beregnet ud fra $E=mc^2$. Når det sker, forøges dens levetid med ca. samme faktor som $(E_{kin}+E)/E$ fordi den bevæger sig i forhold til os. Den kan altså kun sige klik i vores tæller hvis det er rigtigt at et ur i bevægelse går langsomt. Nå, siger skeptikeren, hvad så hvis jeg rider på ryggen af myonen? Så ligger den jo stille i forhold til mig og må derfor have sin normale levetid på 2.2 μs Ja, det er helt rigtigt og forklaringen er den, at ikke bare ændrer tidens gang sig for ting i bevægelse, rummets udstrækning ændres også. Således synes afstanden til Jorden for myonen at være forkortet med samme faktor som tiden før blev forlænget med og den kan igen nå ned til jordoverfladen. I den ekstreme grænse hvor bevægelsen foregår med lysets fart, som den naturligvis gør for fotoner (lyspartikler), er afstanden set for fotonen således nul (!) og man kan sige at vi – igen set fra fotonens synspunkt – henter fotonen fra Solens overflade med øjet når vi kigger derop.



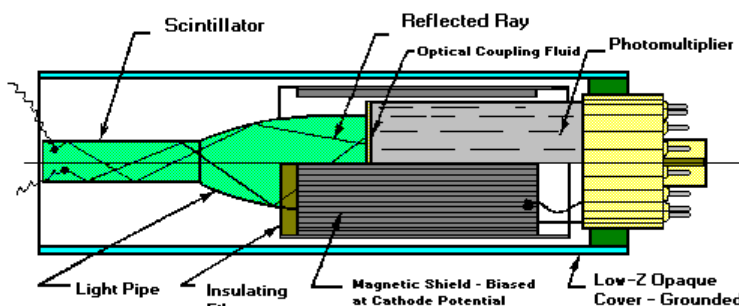
De oprindelige partikler i den kosmiske stråling, som kan være protoner, fotoner eller store atomkerner, kan stamme fra Solen, Mælkevejen, vores egen galaksehob eller sågar fra endnu fjernere egne af Universet. Når en sådan energirig partikel rammer et atom i den øverste del af Jordens atmosfære 'smadres' atomet og dets kerne i mange dele. De derved dannede partikler, som ligeledes er energirige, kan ramme atomer længere nede i atmosfæren og denne lavine-proces kan fortsætte indtil jordoverfladen er nået eller energien falder tilstrækkeligt meget. Ved at måle antallet i og udstrækningen af partikelbygen kan man feks. udlede hvad energien af den oprindelige partikel var.

Denne kosmiske stråling blev opdaget i begyndelsen af de tyvende århundrede og udgør som nævnt ca. 25 % af den

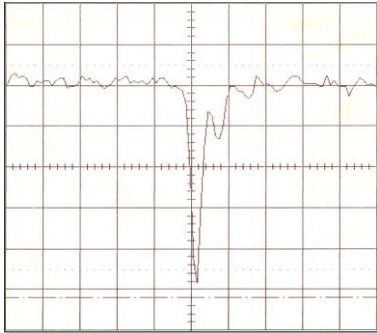
naturlige baggrundsstråling. I en kosmisk byge (se figuren) kan indgå adskillige usædvanlige partikler som feks. myoner (μ^+ , μ^-), pioner (π^+ , π^- , π^0) og positroner (e^+). Opdagelsen af den første antipartikel, positronen, i 1932 var i den kosmiske stråling.

Denne øvelse er baseret på brugen af et såkaldt scintillerende materiale, en scintillator. Der findes mange forskellige typer scintillerende materialer, organiske forbindelser (feks. polystyren) såvel som

uorganiske (natriumiodid, NaI) og både flydende og faste ved almindeligt tryk og temperatur. Fælles for dem alle er at de afgiver lys ved passagen af en ladet partikel, kort sagt fordi den passerende ladning eksiterer atomer i stoffet der efter kort tid henfalder under udsendelse af lys. Dette lys transporteres videre i en lysleder. Idet lysmængden er relativt lille (typisk ca. 20.000 fotoner pr. cm) skal den forstærkes kraftigt hvilket finder sted i en fotomultiplikator (Photo-Multiplier-Tube, PMT). I fotomultiplikatoren benyttes den foto-elektriske effekt til at lade lys udsende elektroner. Disse elektroner accelereres gennem et spændingsfald og rammer derefter en plade hvor hver elektron afgiver mindst to sekundære elektroner. Denne proces fortsættes gennem ca. 10-12 trin hvorefter de få elektroner har udviklet sig til en elektron-lavine der kan detekteres



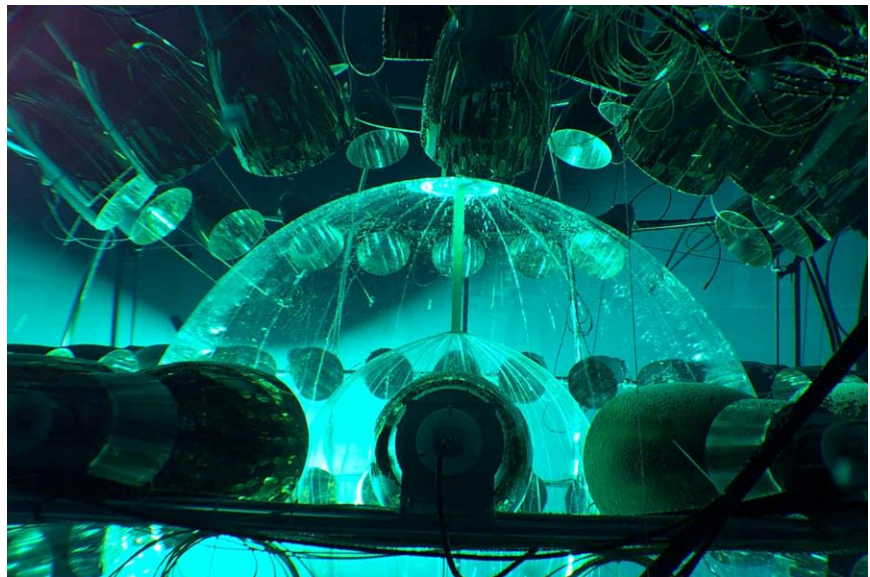
som en elektrisk puls. Fordelingen af spændingsfald mellem de mange plader styres af den såkaldte



base. Generelt kalder man hele sammensætningen af scintillator, lysleder, foto-multiplikator og base for en scintillator-tæller. En typisk puls fra en scintillator-tæller er vist i figuren her (tidsinddeling 10 ns). Det ses at den første flanke (rise-time) er meget stejl, typisk få nanosekunder (ns). Med forskellige tricks

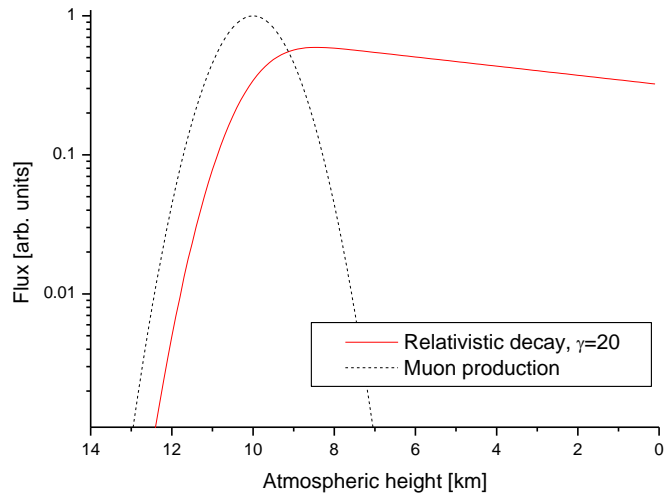
kan det lade sig gøre at få tidsopløsning af gennemtrængende partikler ned på ca. 0.1 ns, hvilket ikke er nødvendigt her. Idet foto-multiplikatoren selvsagt er meget lysfølsom må der ikke slippe lys ind fra omgivelserne. Derfor pakkes scintillator og lysleder ind i reflekterende folie og dernæst i mørk plast og tape der forbindes tæt ved overgangen til foto-multiplikatoren.

En typisk PMT kan tåle -2 kV og begynder multiplikation allerede ved -1.6 kV. En god tommelfingerregel er at forstærkningen fordobles for hver 40 Volt spændingen øges. Forbind udgangen af basen til et oscilloskop der sættes til at trigge på den negative flanke (baserne giver meget tit et negativt signal, her alle, men det gælder ikke generelt) med 20 mV skala, tidskonstant 20 ns og trigger normal.

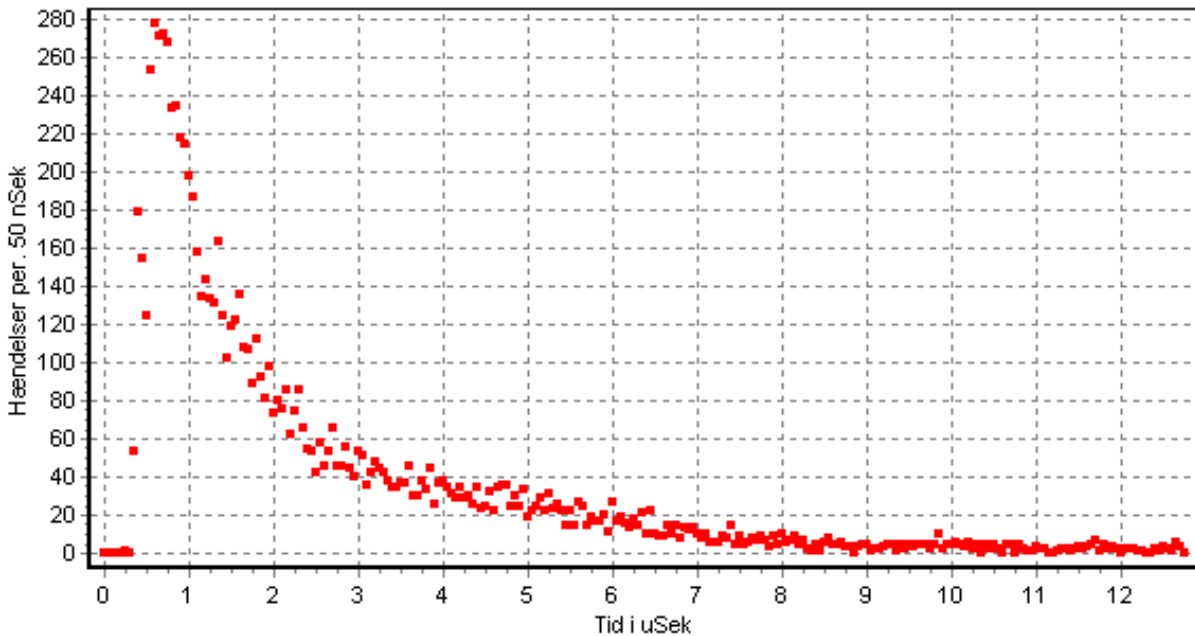


Udover forbindelsen til højspænding (HV) har de fleste baser en indgang der benævnes -800 V. Denne indgang benyttes som ekstra forsyning ved høje tællerater, dvs. ca. 1 mio. pr. sekund eller så. Idet vi forventer i størrelsesordenen 1 pr. sekund er der ingen grund til at benytte -800 V.

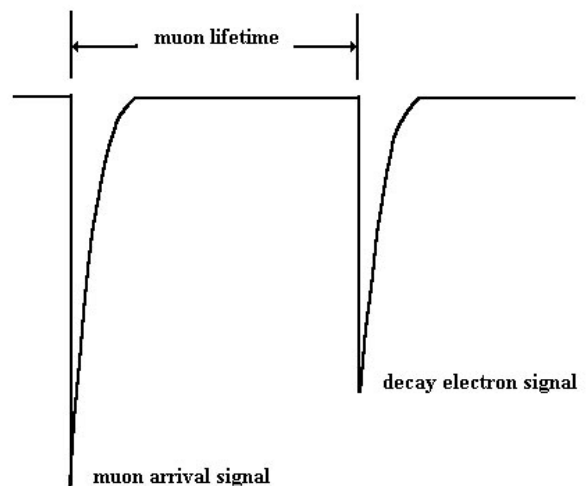
Anden del af øvelsen går ud på at måle myonens levetid i hvile. Til dette benyttes en tyk scintillator med et relativt stort areal. Idet myonen løsriver eller eksiterer elektroner langs sin bane i scintillatoren hvorunder der udsendes lys, vil den tabe energi. I nogle tilfælde taber den så meget energi at den

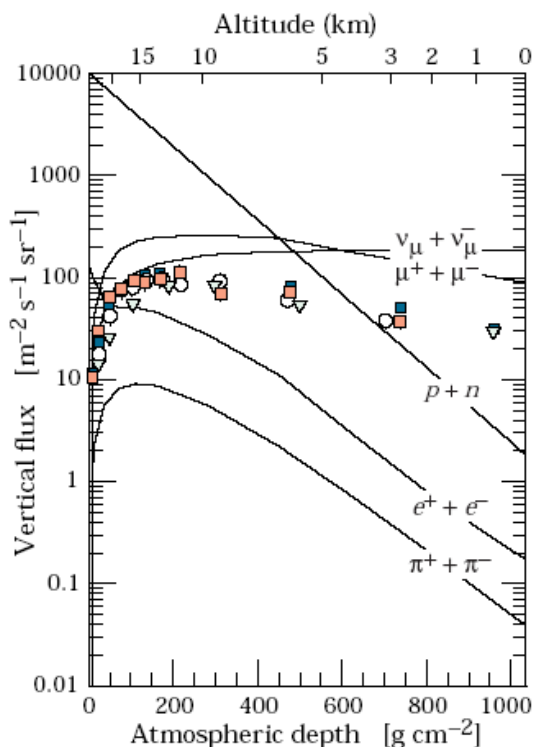


Muonens Levetid



standsnes i scintillatoren. Der vil derfor komme to pulser tæt forfulgt af hinanden: Den første i det øjeblik myonen gennemtrænger scintillatoren og bringes til standsning og den anden når myonen henfalder til en elektron der også giver anledning til lysudsendelse i scintillatoren. Disse to pulser vil være separeret med den pågældende myons levetid i hvile.





Et typisk måleresultat (taget over 4 dage) ser ud som vist i figuren herover.

Myonen har selvsagt 'forbrugt' af sin levetid når den rammer scintillatoren, men det vigtige er *formen* af henfaldskurven – at påbegynde målingen senere svarer simpelthen til blot at have et mindre antal myoner at tælle henfaldet af.

Det sidste trin i overbevisningen er et kvalitativt argument for at myonerne faktisk produceres i 10 km højde. I figuren herover til venstre er vist det observerede antal partikler (pr. areal, tid og retning), bla. myoner ($\mu^+ + \mu^-$), som funktion af den

atmosfæriske dybde, omsat på den øverste skala til højde. Læg mærke til den logaritmiske y-skala.

På figuren er datapunkterne for myoner og alle kurverne er modelberegninger.

Som et kvalificeret gæt kan vi antage, at myonerne produceres normalfordelt omkring højden 10 km, med en varians på 0.8 km (den prikkede kurve i figuren herover, til højre). Endvidere antager vi for at lette beregningen at de alle produceres med en Lorentz faktor på $\gamma=20$ og at de henfalder i overensstemmelse med tidsforlængelsen baseret på denne værdi af γ . Resultatet er vist i figuren som den røde, fuldt optrukne linie, og en sammenligning med forrige figur peger kraftigt i retning af, at fortolkningen med de ca. 10 km er korrekt.