

Nyt fra G-2 eksperimentet

Bernhard Lind Schistad, Midtbyens Gymnasium, Mercantec

I Kvant nr. 3 fra 2018 omtalte vi G-2-eksperimentet, hvor myonens magnetiske moment blev målt med en nøjagtighed på ti decimaler. Da målingerne afveg fra Standardmodellens teoretiske forudsigelser, blev det besluttet at flytte hele eksperimentet fra Brookhaven til Chicago, for at gentage målingerne med større præcision. Nu foreligger de første målinger fra Chicago, og de har vagt opsigt blandt fysikerne, selv om vi endnu ikke kan drage nogen endelig konklusion om, hvorvidt Standardmodellen er bekræftet eller modsagt.

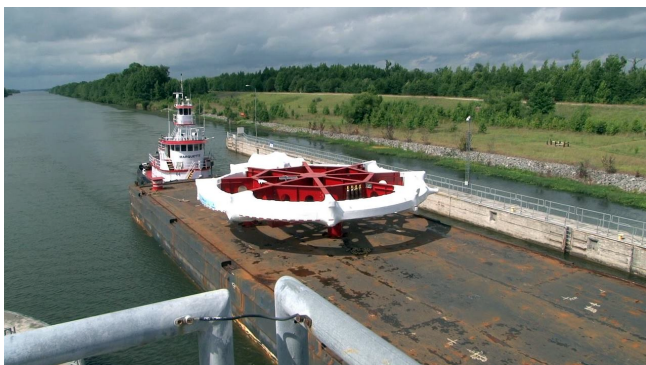
Ifølge Dirac ligningen skulle myonen have et magnetisk dipolmoment på 2 Bohr magnetoner ($2\mu_B$). Denne faktor kaldes G-faktoren. Men på grund af vakuumpolarisation, er G-faktoren en lille smule højere end 2. Derfor er det interessant at måle differencen G-2. Som nævnt måler G-2-eksperimentet myonens magnetiske moment med ekstremt høj præcision. Når dette er interessant, skyldes det, at det magnetiske moment påvirkes af alle kendte vekselvirkninger og elementarpartikler i Standardmodellen, og at det kan beregnes teoretisk med tilsvarende præcision. Enhver afvigelse vil derfor være en indikation på, at der findes fysiske processer, som bidrager til det magnetiske moment, men som ikke er en del af Standardmodellen.

Den sidste måling af G-2 for myonen blev udført ved Brookhaven National Laboratory. Her fandt man en afvigelse på tre standardafvigelser i forhold til de bedste teoretiske beregninger. Dette er interessant, men afvigelsen er ikke stor nok til, at det kan kaldes en opdagelse. Det blev derfor besluttet at flytte hele lagerringen, der blev brugt til at lagre myoner, til Fermilab ved Chicago. Her regnede man med at opnå en usikkerhed, der er en faktor fire bedre end målingerne fra Brookhaven.

Denne flytning er nu udført, og de første målinger fra Fermilab blev offentliggjort den 7. april i år. Vi vil nu gennemgå hvad, disse resultater viser.

Flytning til Fermilab

At flytte myonlagerringen fra Brookhaven til Fermilab har været en formidabel opgave. Da ringens superledende magneter var monteret i en fast ramme, måtte denne transporteres fuldstændig fladt og i ét stykke for at undgå at beskadige de superledende kabler. Denne transport forgik både til lands og til vands, se figur 1.



Figur 1. Transport af lagerringens magneter.

Efter ankomsten til Fermilab, blev lagerringen monteret og tilsluttet en partikelstråle fra laboratoriets myon-leveringsring, hvor π -mesoner produceret med protoner fra acceleratorkompleksets booster, henfalder til myoner, som opsamles i lagerringen. Hermed kunne man fylde ringen med ca. fire gange så mange myoner, som man kunne opnå i Brookhaven.

For at forbedre præcisionen af de nye målinger, blev magnetfeltet i ringen opmålt på ny med en nøjagtighed på 15 ppb [1].

De første resultater

G-2-eksperimentet har nu offentliggjort de første målinger fra den nye opstilling ved Fermilab [2]. Disse målinger er i god overensstemmelse med de tidligere målinger fra Brookhaven, og bekræfter derfor, at der er en uoverensstemmelse med de teoretiske beregninger fra Standardmodellen.

Vi minder om at myonens magnetiske moment er givet ved formlen

$$\vec{\mu}_e = -2(1 + a_\mu) \cdot \mu_B \cdot \frac{\vec{s}}{\hbar}, \quad (1)$$

hvor \vec{s} er myonens spin ($\pm\frac{1}{2}\hbar$) og a_μ er det anomale magnetiske moment, som forsøget måler.

De gamle målinger som vi refererede i Kvant målte a_μ (Brookhaven) = $116592089 \cdot 10^{-11}$.

Da $g_s = 2a + 2$ giver dette en g -faktor på g_s (Brookhaven) = 2,0023318418.

De nye målinger er baseret på data fra de første 15 uger, og giver resultatet:

$$a_\mu \text{ (FNAL)} = 116592040(54) \cdot 10^{-11}.$$

Den tilsvarende g -faktor bliver

$$g_s \text{ (FNAL)} = 2,0023318408.$$

Dette er i meget god overensstemmelse med Brookhavens måling, og dette er betryggende, når vi tager hensyn til, at målingerne er udført af et helt andet hold af fysikere. Dette tyder på, at der er kun statistiske usikkerheder og ikke systematiske afvigelser. De to resultater kan derfor slås sammen og vi får:

$$a_\mu \text{ (EXP)} = 116592061(41) \cdot 10^{-11}.$$

$$g_s \text{ (EXP)} = 2,0023318412.$$

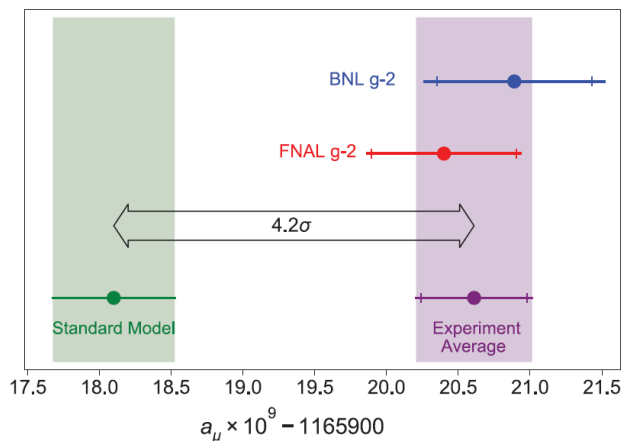
Teoretiske beregninger

Siden Brookhavens resultater forelå, har teoretikerne forfinet deres beregninger. Det seneste resultat fra "regnedrengene" baseret på Standardmodellen er [3]:

$$a_\mu \text{ (SM)} = 116591810(43) \cdot 10^{-11}.$$

Når vi sammenligner de to målinger, det kombinerede resultat og teorien, ser vi klar afvigelse på ca. fire standardafvigelser (figur 2).

Den foreløbige konklusion bliver derfor, at det ser ud til, at Standardmodellen ikke er i stand til at forklare myonens magnetiske moment, og at det derfor må eksistere ny fysik ud over Standardmodellen. Dette har givet overskrifter i dagspressen.



Figur 2. Sammenligning mellem teori og målinger af myonens anomale magnetiske moment.

Sten i skoen

Men samtidig med offentliggørelsen af de nye målinger har en anden gruppe af teoretikere regnet på det bidrag til myonens magnetiske moment, som kommer fra loopdiagrammer, hvor der indgår hadroner. Som vi så i den forrige artikel, giver disse diagrammer et lille bidrag fra den ottende decimal i g_s . Det er meget svært at regne på disse diagrammer, da de involverer partikler som består af kvark/antikvark par. De beregninger, som “regnedrengene” anvendte, kommer frem til, at loopdiagrammer af ledende orden med hadroner, giver et bidrag til a_μ -faktoren på a_μ (LO-HPV) = $693,9 \cdot 10^{-10}$. Disse beregninger er baseret på en gitter-approksimation af kvantekromodynamikken, hvor rumtiden deles op i diskrete punkter, og man derefter lader antal punkter gå mod uendelig.

Men lige som champagnepropperne skal til at springe, bringer en anden teorigruppe fra Budapest, Wuppertal og Marseille (BMW kollaborationen) en alternativ beregning af bidraget fra hadronerne i Nature [4]. De har baseret deres beregninger på computersimulationer af kvantekromodynamikken, og de kommer frem til, at bidraget fra ledende ordens vakuum polarisation med hadroner er a_μ (LO-HPV) = $708,7 \cdot 10^{-10}$. Dette giver total faktor på a_μ (BMW) = $116591978 \cdot 10^{-11}$ og $g_s = 2,0023318396$. Nu ligger den teoretiske værdi mindre end to standardafvigelser fra de nye målinger, og der er ikke længere nogen signifikant uoverensstemmelse.

Konklusion

Med de nye målinger står vi den paradoksale situation, at usikkerheden på de teoretiske beregninger af myonens magnetiske moment er større end usikkerheden af målingerne. De nye målinger fra Fermilab er i smuk overensstemmelse med de gamle fra Brookhaven. I løbet af de kommende par år vil vi få nye data baseret på mere statistik, og vil kunne forvente at få måleusikkerheden halveret. Endvidere er der ingen tegn på systematiske afvigelser mellem de to resultater. Vi kan derfor konkludere, at vi har meget gode måledata med smuk overensstemmelse mellem resultaterne fra forskellige laboratorier.

Mere uoverskueligt ser det ud på teorisiden. Her er det bidraget fra vakuum polarisation med hadroner, det vil sige partikler der indeholder kvarker, der driller. Vi har to beregninger foretaget af to forskellige kollaborationer med forskellige metoder, der afviger fra hinanden. Dette er systematiske afvigelser, der ikke kan forklares med afrundingsfejl og approksimationer.

Indtil vi får afklaret hvilken beregningsmetode der er den rigtige, kan vi ikke konkludere, om Standardmodellen modsiges af målingerne.

Hvis “regnedrengenes” beregninger er de rigtige, har eksperimentet ved Fermilab påvist at der findes ukendte fysiske effekter (elementarpartikler) som påvirker myonens magnetiske moment, og som ikke er en del af Standardmodellen

Litteratur

- [1] T. Albahri m.fl. (2021) Magnetic-field measurement and analysis for the Muon g-2 Experiment at Fermilab, *Phys.Rev. A*, bind **103**, side 042208.
- [2] B. Abi m.fl. (2021) Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm, *PPhys.Rev.Lett*, bind **126**, side 141801.
- [3] T. Aoyama m.fl. (2020) The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model, *Phys.Rep.*, bind **887**, side 1.
- [4] S. Borsanyi, S. Fodor, J.N. Guenther m.fl. (2021) Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice QCD, *Nature*, bind **593**, side 51–55.



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 har i de sidste syv år undervist i fysik og matematik på Viborg Tekniske Gymnasium.