

**UNIVERSITATEA DE VEST DIN  
TIMIȘOARA**

**FACULTATEA DE FIZICĂ**

# **TEZĂ DE DOCTORAT**

--- Rezumat ---

**Procese radiative pe spațiu-timpul de  
Sitter în ordinul întâi al teoriei  
perturbațiilor**

**Coordonator științific,**

**Prof. univ. dr. COTĂESCU I. Ion**

**Doctorand,**

**BLAGA Robert-Cristian**

## Timișoara

2016

În această teză prezentăm teoria câmpurilor cuantice pe spații-timp curbate și aplicăm formalismul pentru analiza a două procese din electrodinamica cuantică de pe spațiul de Sitter în expansiune.

Capitolul 1 conține o scurtă recenzie a principalelor sisteme de coordonate utilizate în literatură pentru a descrie spațiu-timpul de Sitter. Varietatea de Sitter reprezintă un hiperboloid 4-dimensional ce poate fi acoperit complet (harta globală) sau parțial (harta euclidiană și cea statică) de diferite sisteme de coordonate. În aceasta teză considerăm harta euclidiană în expansiune care, cu secțiunile ei spațiale plane plate infinite, descrie cel mai bine Universul nostru. Scrisă în timp conform, această metrică este local conformă cu metrica Minkowski.

În Capitolul 3 prezentăm rețeta de bază pentru transcrierea teoriilor de câmp de pe spațiul plat pe un spațiu-timp curbat oarecare. Introducem relațiile de comutare, construim spațiul Fock, înșirăm mărimile conservate și definim funcțiile Green. Teorema Wick pentru produse ordonate normal și ordonate cronologic este prezentată în detaliu. Utilizăm cuantificarea canonică pentru cuantificarea câmpului scalar respectiv electromagnetic, pe harta în expansiune, relevant din punct de vedere cosmologic, a variației de Sitter. Pentru cazul câmpului scalar, tratăm în detaliu problema selecției modurilor și a stării de vid. În infinitul trecut gaviția devine asimptotic slabă și astfel modurile corecte ar trebui să coincidă cu cele obținute cu aproximația WKB. Modurile corespunzătoare se numesc moduri Bunch și Davies, care definesc vidul cu același nume. Arătăm ca modurile au, până la un factor de fază, limita plată corectă. Utilizând interpretarea naivă pentru frecvențe pozitive/negative în infinitul viitor, punem în evidență fenomenul numit producție gravitațională de particule cu ajutorul coeficienților Bogoliubov. Câmpul electromagnetic fiind conform, teoria se transcrie direct din teoria de pe spațiul plat.

În Capitolul 4 dezvoltăm electrodinamica cuantică scalară (sQED) pe spațiul de Sitter în expansiune. Prezentăm ecuațiile de câmp în interacțiune și scriem soluții integrale formale cu ajutorul funcțiilor green retardate și avansate, soluții numite *câmpuri in* și *out*. Mecanismul de reducere LSZ este utilizat pentru reducerea particulelor din starea inițială și finală. Teoria perturbațiilor este aplicată pentru obținerea amplitudinilor de tranziție pentru

procesele de ordinul întâi din electrodinamica cuantică scalară. Descriem succint conceptele probabilităților sumate, prin care urmărim doar câmpurile conforme din problemă (câmpul Maxwell în cazul nostru). De exemplu, dat fiind o stare inițială, numărăm doar fotonii din starea finală, mediind peste toate configurațiile posibile ale câmpului scalar. Această procedură rezultă într-o cantitate ce este independentă de definiția conceptului de particule în starea finală, practic evitând ambiguitățile introduse din cauza prezenței producției gravitaționale de particule.

În Capitolul 5 aplicăm formalismul dezvoltat pentru calculul amplitudinii de tranziție a unui foton ce se dezintegrează într-o pereche de particule scalare. Asemenea procese sunt permise pe spații dinamice, deoarece în aceste cazuri principiile de conservare a energiei și impulsului nu sunt strict respectate. Amplitudinile diferitelor procese de ordinul întâi au toate aceeași structură: o funcție delta Dirac ce reprezintă conservarea impulsului, respectiv integrala temporală ce contribuie fizica netrivială. Obținem o expresie compactă pentru probabilitatea de tranziție și efectuăm o analiză detaliată în funcție de intensitatea câmpului gravitațional. În condiții de câmp gravitațional slab, utilizând o aproximație potrivită, obținem o expresie analitică pentru probabilitate. Printr-o analiză grafică arătăm că în general probabilitatea este mai mare la unghiuri de emisie mici și impulsuri comparabile, și scade per total când mergem spre limita plată. Pe măsură ce mergem spre zona de câmp gravitațional puternic, configurații cu unghiuri de emisie mai mari comparate cu direcția de mișcare, devin din ce în ce mai favorabile, probabilitatea crescând per total. În condițiile de inflație (universal timpuriu) găsim că probabilitatea este divergentă, fiind nevoie de o regularizare adițională pentru a extrage informație fizică din probabilitate. Analizăm unghiul mediu de emisie, definit ca o medie ponderată, obținând conform cu așteptările că unghiul mediu de emisie tinde spre zero pe măsură ce mergem spre limita plată. Obținem expresii aproximative pentru probabilitate în jurul a diferite configurații unghiulare. Găsim că în general probabilitatea scade exponențial, însă această dependență este foarte slabă atunci când perechea este emisă la unghiuri mici. Acesta deschide posibilitatea ca procesul să rămână semnificativ chiar și pentru expansiunea prezenta a Universului, cu condiția ca masa câmpului scalar să fie suficient de mică. Argumentăm ca rezultatul nostru poate fi utilizat pentru a seta un prag inferior pentru masa a (sau chiar a elimina) candidați pentru materia întunecată ipotetici cu mase foarte mici și care interacționează electromagnetic.

În Capitolul 6 studiem radiația emisă de către o sarcină scalară inerțială pe spațiul de Sitter în expansiune. Ca prim pas, obținem o estimare pentru puterea și energia emisă printr-un calcul de electrodinamică clasică. Găsim puterea comoving emisă ca fiind similară cu puterea emisă de o sarcină accelerată pe spațiul Minkowski (formula Larmor). În continuare, definim energia radiată prin amplitudinea de tranziție a procesului analog din

sQED. Pentru a obține o expresie compactă pentru energie, aplicăm o aproximație de câmp slab, efectuând o expansiune a modurilor. O simplificare adițională este obținută considerând regimul nerelativist, respectiv ultra-relativist pentru mișcarea sursei. În limita nerelativistă energia emisă este obținută ca o serie de puteri în constanta lui Hubble, cu termenul de ordin principal reproducând rezultatul clasic. Obținem de asemenea și primele corecții cuantice. În limita ultra-relativistă energia are o dependență problematică la frecvențe mari ce duce la o divergență logaritmică. Interpretăm această divergență ca făcând parte din clasa de probleme similare ce apar de spațiul de Sitter. Calculăm puterea radiată de către razele cosmice ultra-energetice (Ultra-High-Energy Cosmic Rays) pentru expansiunea prezentă, obținând o valoare prea mică pentru a putea fi măsurabilă, cu prima corecție cuantică fiind cu multe ordine de mărime și mai mică. Argumentăm că experimente viitoare în care vom putea accelera electroni la energii foarte mari ar putea genera un efect măsurabil. Aceasta ar reprezenta în esență o măsurare indirectă a curburii spațiu-timpului.

Apendicele A conține relații și formule ale funcțiilor Bessel și Hankel necesare pentru evaluarea probabilităților de tranziție a proceselor de ordinul întâi. În Apendicele B introducem conceptul ce stă la baza aproximației WKB și efectuăm un calcul pentru energia radiată de către o sarcină inerțială. Rezultatul este identic cu cel găsit în Capitolul 6, obținut printr-o procedură alternativă.