



KYLMÄN JA TIHEÄN QCD-AINEEN TERMODYNAMIIKKA

FYS4006 Tutkielmaseminaari

Matilda Marjamäki 19/11/2024





SISÄLTÖ

- Kvanttiväridynamiikka
- QCD:n faasidiagrammi
- Kokeelliset menetelmät
- Teoreettiset työkalut
- Kvarkkiaine
- Yhteenveto
- Lähteet



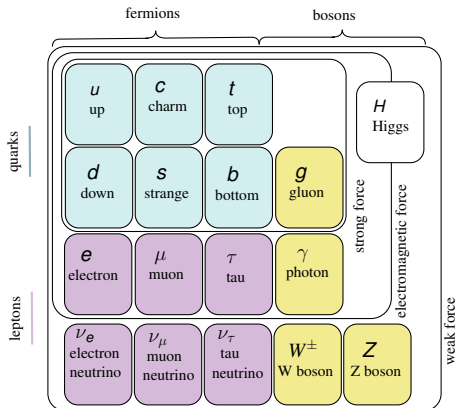
KVANTTIVÄRIDYNAMIIKKA

- Hiukkas- ja ydinfysiikassa alkeishiukkasjärjestelmiä tarkastellaan kvanttikenttäteorioiden (QFT) avulla
- Standardimalli (SM) on keskeinen kvanttikenttäteoria
 - Selittää kolme perusvuorovaikutusta: sähkömagneettinen, heikko ja vahva vuorovaikutus
 - Kvanttiväridynamiikka (QCD) on vahvan vuorovaikutuksen teoria



KVANTTIVÄRIDYNAMIIKKA

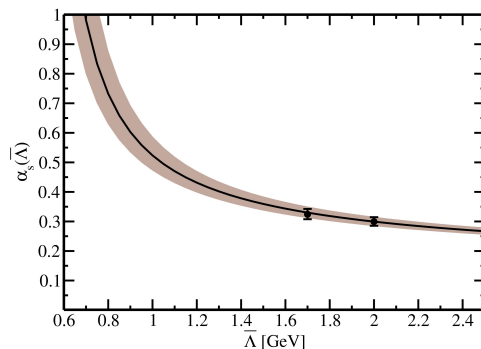
- QCD:ssa aineen rakennetta tutkitaan tarkastelemalla hyvin pienen mittakaavan objekteja
- Keskeiset hiukkaset: kvarkit ja gluonit
- Yhteneväisyyksiä sähkömagnetismin kanssa





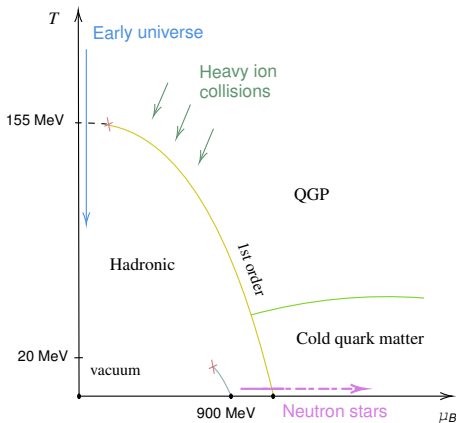
KVANTTIVÄRIDYNAMIIKKA

- Sidotut tilat
 - Kvarkkien välinen efektiivinen kytkinvakio, α_s , on suuri
 - Kvarkit sitoutuvat tiukasti hadroneiksi
- Asymptoottinen vapaus
 - Efektiivinen kytkinvakio, α_s , pienenee logaritmisesti
 - "Vapaita" hiukkasia





QCD:N FAASIDIAGRAMMI



- **y-akseli:**

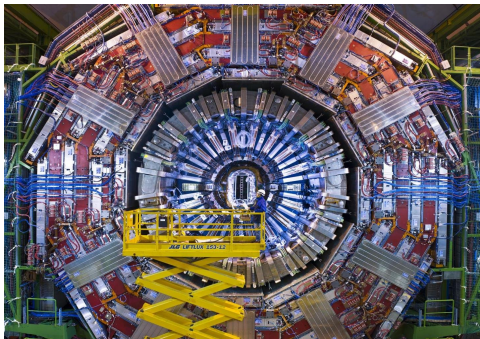
- Lämpötilan T kasvaessa siirrytään hadronikaasusta kvarkki-gluoniplasmaan (QGP)

- **x-akseli:**

- Kun T on matala ja baryonitiheys (μ_B) kasvaa siirrytään ydinmateriaalista kylmään ja tiheään kvarkkiaineeseen



KOKEELLISET TUTKIMUSMENETELMÄT



[1]

- Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)
- Large Hadron Collider (LHC)
- Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR)
- Astrofysiikka



TEOREETTISET TYÖKALUT

QCD-aineen termodynaamista tasapainoa voidaan tarkastella partitiofunktion avulla:

$$Z_{\text{QCD}} = \int \mathcal{D}A_\mu \mathcal{D}\bar{\psi} \mathcal{D}\psi e^{-\int_0^\beta dx_0 \int d^3x (\mathcal{L}_{\text{QCD}} - \bar{\psi}^\dagger \mu \psi)}$$

- QCD:n Lagrangia: $\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \sum_f^{N_f} \bar{\psi}_f (i\not{D} - m_f) \psi_f - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F_a^{\mu\nu}$



TEOREETTISET TYÖKALUT

Partitiofunktioista, Z_{QCD} , voidaan johtaa termodynaamiset suureet:

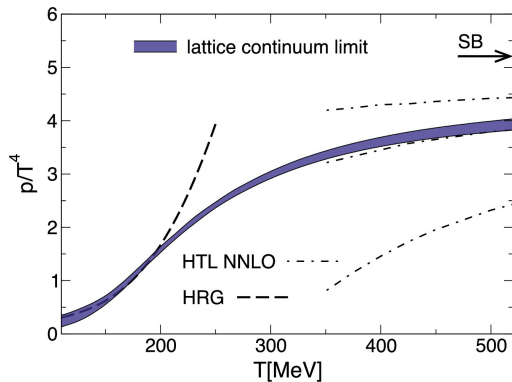
$$p_{\text{QCD}} = \frac{\partial}{\partial V}(T \log Z_{\text{QCD}}), \quad N_i = \frac{\partial}{\partial \mu_i}(T \log Z_{\text{QCD}}), \quad \dots$$

- Yhtälöissä: V =tilavuus, T =lämpötila, μ_i =kemiallinen potentiaali



TEOREETTISET TYÖKALUT

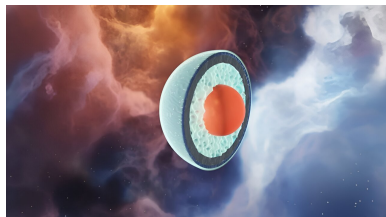
- Ei-häiriöteoreettiset menetelmät (esim. hilasimulaatio)
- Häiriöteoreettiset menetelmät (α_s :n laajennus)





KVARKKIAINE

- Kvarkkiaine = materia nollalämpötilassa ja äärellisillä tiheyksillä ($2 - 10 \text{ ns}$)
- Ei osata vielä tarkkaan määrittää
- Neutronitähdet ja mustat aukot



[2] Neutronitähti



KVARKKIAINE

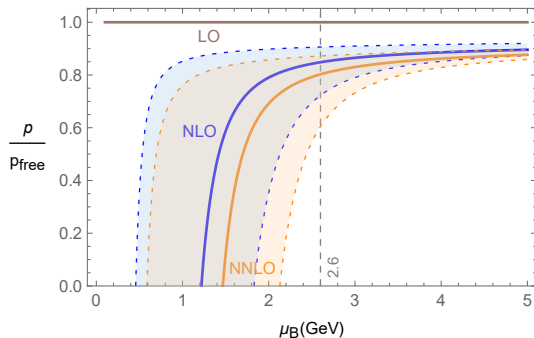
Kylmän ja tiheän kvarkkiaineen paineen laskeminen:

$$p_{QCD} = \frac{T}{V} \ln Z_{QCD} = \text{gluon loop} - \frac{1}{2} \text{ghost loop} + \mathcal{O}(g^4) + \dots \quad (1)$$

- Feynmanin säännöt



KVARKKIAINE



- Paine tiedetään tällä hetkellä varmasti kolmen silmukan tasoon, α_s^2 , (seuraavan-seuraavan-kertaluvun termi, NNLO) asti
- Myös N^3LO , α_s^3 , tulokselle vahvaa näyttöä
 - Haastava laskea monimutkaisten diagrammien, integraalien ja syntyvien divergenssien takia



Yhteenveto

- QCD:n tärkeä ominaisuus on asymptottinen vapaus
- QCD ainetta voidaan tutkia kokeellisesti ja teoreettisesti, joista kokeelliset menetelmät ovat ensisijaisia
- Nollalämpötilan ja äärellisen tiheyden alueen (kvarkkiaineen) määrittäminen ei ole vielä mahdollista
 - Uusia lupaavia tutkimussuuntia, kuten neutronitähtien hyödyntäminen
- Teoreettinen tutkimus jaetaan häiriöteoreettisiin ja ei-häiriöteoreettisiin menetelmiin
 - Partitiofunktion avulla voidaan laskea termodynaamisia suureita
 - Häiriöteoria on hyödyllinen kvarkkiaineen tutkimuksessa (paineen laskeminen)
 - Johtavana tuloksena N^3LO (α_s^3)



LÄHTEET

- [1] [National Geography](#). “11 cosas que no sabías sobre el LHC (CERN)”. (*tam-mikuutammi* 2020). URL: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/grandes-reportajes/11-cosas-que-no-sabias-sobre-lhc-cern_13139.
- [2] [Helsingin yliopisto](#). “Further evidence for quark matter cores in massive neutron stars”. (2024). URL: <https://phys.org/news/2024-01-massive-neutron-stars-cores-quark.html>.
- [3] [Saga Säppi](#). “Dense Quantum Chromodynamics and Hard Thermal Loops”. (*Lokakuu* 2020).
- [4] [A. Vuorinen](#). *The pressure of QCD at finite temperature and quark number density*. 2004. arXiv: [hep-ph/0402242](#) [[hep-ph](#)].
- [5] [Aleksi Kurkela](#), [Paul Romatschke](#) ja [Aleksi Vuorinen](#). “Cold quark matter”. *Physical Review D* 81.10 (*toukokuu* 2010). ISSN: 1550-2368. DOI: [10.1103/physrevd.81.105021](#). arXiv: [0912.1856](#) [[hep-lat](#)].
- [6] [Tyler Gorda et al.](#) “Equation of State of Cold Quark Matter to $\mathcal{O}(\alpha_s^3 \ln \alpha_s)$ ”. *Physical Review Letters* 131.18 (*marraskuu* 2023). ISSN: 1079-7114. DOI: [10.1103/physrevlett.131.181902](#). arXiv: [2307.08734](#) [[hep-lat](#)].
- [7] [Eemeli Annala et al.](#) “Multimessenger Constraints for Ultradense Matter”. *Physical Review X* 12.1 (*maaliskuu* 2022). ISSN: 2160-3308. arXiv: [arXiv:2105.05132](#) [[astro-ph.HE](#)].



Kiitos!

