1 Uvod

Snov se v naravi nahaja v štirih agregatnih stanjih (trdno,tekoče,plinasto in plazmatsko). Analogijo h temu poskušajo znanstveniki uporabiti pri raziskovanju obnašanja jedrske snovi. Iščejo enačbo stanja jedrske snovi, zvezo med gostoto jedrske snovi in temperaturo. Jedro, ki se nahaja v naravi, naj bi bilo v tekoči fazi (kapljica). Trdno fazo bi predstavljala kristalizirana jedrska tekočina (lažje nevtronske zvezde naj bi se nahajale v tem stanju), plinasto pa plin lahkih jeder in prostih nukleonov. Prosti kvarki in gluoni bi tvorili plazmatsko fazo. Kvarki so osnovni gradniki delcev imenovanih hadroni. H hadronom spadata tudi nukleona, ki ju tvorijo trije kvarki, kot tudi mezoni, ki jih tvorita kvark in antikvark. Kvarke vežejo gluoni. Izmenjava gluonov povzroči silo, da kvarki ne morejo pobegniti iz hadronov, zato ne obstojajo sami. Vsi poskusi zaznati posamezne kvarke so se izjalovili. Za boljše razumevanje si predstavljajmo kvarke vezane s kosom elastike. Če bi poskušali ločiti dva kvarka, bi se elastika raztegnila in energija, ki smo jo vložili za oddaljevanje kvarkov, bi se shranila podobno kot pri vzmeti. To pomeni, da je sila med dvema kvarkoma tem večja čim dlje sta vsaksebi. Nasprotno smo vajeni pri običajnih silah (gravitacija, elektromagnetna). Raztezanje pa ne gre v nedogled. Elastika poči, toda le če je bilo v sistem dveh kvarkov vloženo dovolj energije, da se tvorita nova kvarka na nasprotnih straneh elastike. Teorija močne interakcije napoveduje ločitev kvarkov in tvorbo PKG (plazma kvarkov in gluonov) pod ekstremnimi pogoji. Pod temi razumemo veliko gostoto energije in visoko temperaturo. Upajo, da bodo takšne ekstremne pogoje ustvarili s trki težkih ionov. Pri takšnem visokoenergijskem trku se kvarki dobesedno odtrgajo iz nukleonov. Pri tem raztegnejo elastiko, ki jih povezuje z drugimi kvarki (kvarka se gibljeta vsak v svojo smer s hitrosjo blizu svetlobne), dokler ta ne poči. Elastika absorbira veliko kinetično energijo pri trku nukleona z nukleonom, zaradi česar se lahko tvori veliko število delcev na mestu trka (slika 1).

2 Trki Težkih ionov

Napredek pri raziskovanju plazme so dosegli s poskusi, pri katerih so trkali težke ione. To je zahtevalo naprave, s katerimi bi lahko pospešili ione do visokorelativističnih hitrosti. Pospeševalniki delcev niso bili zgrajeni za takšne eksperimente, energije,ki jih je bilo moč doseči, pa znatno prenizke. Leta 1986 so AGS (Alternating Gradient Synchrotron) v Brookheavenu preuredili v pospeševalnik težkih ionov (Si). Istega leta je začel delovati SPS (Super Proton Synchrotron) v CERNu, ki je pospeševal izotopa kisika in žvepla enakim številom protonov in nevtronov. AGS je dosegel energije do 5 GeV/nukleon, SPS pa tudi do 20 GeV/nukleon v težiščnem sistemu. Leta 1990 so v CERNu ustanovili nov dolgoročni program imenovan "fizika težkih ionov".

Raziskovanje trkov težkih ionov je nov pristop preučevanja lastnosti snovi in sil. Danes z gotovostjo ne moremo potrditi obstoj plazme, lahko pa trdimo, da dobimo pri trku razširjen močno sodelujoč sistem, ki ga nikakor ni mogoče pojasniti z enostavnim sestavljanjem trkov med posameznimi nukleoni. Prve raziskave so pokazale, da so trki težkih ionov zares orodje, s katerim je možno preučevati obnašanje goste hadronske snovi pod ekstremnimi pogoji. Če združimo elementarno interakcijo (barvna interakcija med kvarki) iz fizike osnovnih delcev in makroskopsko sliko snovi iz jedrske fizike, lahko študij trkov prevedemo v termodinamiko elementarnih delcev, kjer se zapletena večdelčna stanja opišejo z nekaj makroskopskimi spremenljivkami (temperatura,gostota,entropija.....). Teorija močne interakcije napoveduje fazni prehod snovi v PKG pri velikih gostotah energije, ki jih dosežemo bodisi s stiskanjem jedrske snovi bodisi z višanjem temperature. Lepo se to vidi na faznem diagramu (slika 2).

2.1 Geometrija trka in razvoj sistema

Jedra so sestavljeni objekti, zato igra njihova geometrija pomembno vlogo pri takšnem trku. Slika 3 prikazuje shemo trka med asimetričnima jedroma A in B. Vpadni parameter loči nukleone na opazovalce in na tiste, ki sodelujejo in trčijo. Za opazovalce predstavlja trk le majhno motnjo. Po trku se iz energije, ki se sprosti, tvorijo kvarki. Sistem je v stanju PKG. Nato se začne hitro širiti v glavnem v longitudinalni smeri. Pri tem pada temperatura in doseže kritično vrednost T_c po nekaj fm/c. Verjetno snov nato preživi relativno dolg čas v mešani fazi, še posebej če je fazni prehod prvega reda. V zadnji hadronski fazi (hadronski plin) se še vedno močno sodelujoč sistem širi, morda celo v urejenem gibanju (skupinski tok). Proces traja dokler ni dosežen tako imenovani "freeze-out" -zamrznitev, kjer se interakcije prenehajo in delci prosto odletijo. Te delce zaznamo v eksperimentu.

2.2 Potrebni pogoji za takšen razvoj

Za takšen potek dogodkov, moramo zadosti določenim pogojem. Če želimo uporabljati makroskopske spremenljivke, morajo biti dimenzije sistema mnogo večje kot je tipičen doseg močne interakcije ($\gg 1$ fm). Prav tako mora sistem vsebovati mnogo delcev ($\gg 1$).

Uporaba termodinamike je mogoča le, če je sistem v ravnovesju ali le malo izmaknjen iz njega. To z drugimi besedami pomeni, da je življenski čas sistema τ mnogo večji od relaksacijskega časa ($\tau \gg 1$ fm/c). Sistem bo ostal v ravnovesju , če bodo delci dovolj sodelovali med seboj, kar pomeni, da je število trkov na delec mnogo večje kot ena.

Gostota energije ϵ, ki je potrebna za PKG, leži predvidoma med 1-3 GeV/fm^3, kar je ekvivalentno T_c=150-200 MeV ali barionski gostoti 5-10 krat večji kot v jedru. Dejansko se te energije dajo doseči s trkanjem težkih ionov.

Ker se sistem hitro razvija, lahko količine ki jih opazujemo, izvirajo iz različnih faz razvoja od prvega trka dveh nukleonov do "freeze-out". Ločevanje posameznih prispevkov glede na izvor pa je težka naloga.

3 Količine, ki jih lahko merimo

Količne, ki jih lahko merimo in so povezane s PKG, so velikost interakcijskega volumna, življenska doba, gostota energije in temperatura. Te količine merimo posredno. Izračunamo jih iz količin, ki jih neposredno merimo. Eksperimentalne količine so število, vrsta, in povprečna gibalna količina delcev, ki pridejo na detektor ali njihova transferzalna energija ($E_t = Esin(\theta)$).

3.1 Transferzalna energija

To je energija, ki jo prispevata le obe na žarek pravokotni komponenti hitrosti ($v_x^2 + v_y^2$) vsakega delca. Največja vrednost transferzalne energije je dosežena pri centralnih trkih najtežjih sistemov (S-U). Znaša 450 GeV, pri čemer dobimo 600 nabitih delcev, kar prekaša vrednosti dobljene pri reakcijah proton-proton za dve velikostni stopnji. Oblika porazdelitve sipalnega preseka je podana na sliki 4 in je tipična za asimetrične reakcije jedro A - jedro B (A$\geq$B). Na njej se lepo vidi odvisnost E_t od geometrije trka. Pri nizkih E_t prevladujejo necentralni trki (b$\gg$0) pri visokih E_t pa centralni trki (b$\approx$0). Iz poradelitve se da prebrati tudi takšne lastnosti kot so deformacija jedra (tarče). Geometrijska slika jedra nam pove, da pri centralnih trkih narašča transferzalna energija sorazmerno z debelino tarče. Pri določenih jedrih se pokažejo odstopanja od te napovedi, kar je posledica velikih kvadrupolnih momentov. Zaradi tega so izmerili ^{238}U veliko večjo E_t kot ^{208}Pb, kljub temu da je le malo večji. Tako bi za uran izmerili maso 400. Izkazalo se je, da je celotna E_t, ki se sprosti pri reakciji težkih ionov z isto energijo na nukleon proporcionalna z $A^{1.11\pm0.03}$ (A je atomska masa)., čeprav bi pričakovali linearno odvisnost. To je posledica skupinskih jedrskih efektov in ustavljanja jeder (po trku se jedri ustavita in celotna energija ostane sistemu). Ker ne obstaja metoda, s katero bi lahko neposredno izmerili začetni volumen in začetno gostoto energije, so gostoto enrgije izračunali iz geometrijskih in kinematičnih predpostavk. Tako so dobili $\epsilon = 1GeV/fm^3$ v AGS in $\epsilon = 2-4GeV/fm^3$ v CERNu, kar ustreza temperaturi 150-200 MeV. Vrednosti bi lahko bile dovolj velike za fazni prehod v PKG.

3.2 Reakcijski volumen in življenska doba

Razširjanje izvorov sevanja ali delcev lahko v principu izmerimo z intenzitetno interferometrijo. Identični delci ubogajo zakone kvantne statistike. (Anti)simetričnost njihove valovne funkcije vodi do korelacij v prostoru gibalna količina-energija, ki je s Fourierjevo transformacijo povezan s prostorom kordinata-čas. Metoda se imenuje po Hanburyu Brownu in Twissu (HBT). Razvita je bila leta 1953 za merjenja radija zvezd. Pri opazovanju zvezd so postavili dva teleskopa 200m narazen in združili svetlobne signale v interferenčno sliko. Na podlagi te slike so določili velikost zvezde, s katere prihajala svetloba.

Identična metoda se uporablja pri merjenju velikosti majhnega poka, kot trke ionov imenujejo drugače. Namesto svetlobe uporabljajo pione. Zanimal jih je transferzalni radij r_t interakcijskega volumna. Pri nizkoenergijskih trkih ionov usterza velikost geometrijskemu področju interakcije (radij manjšega od obeh jeder).Pri trkih težkih visokoenergijskih ionov so s to metodo izmerili $r_t = 6fm$ (končni radij), kar je dvakrat več. Odtod ocena za življensko dobo sistema $\tau \geq 3fm/c$.

3.3 Temperatura

Porazdelitev velikosti gibalne količine v termičnem ravnovesju je podana z Bolzmanovim zakonom. Povprečna vrednost je proporcionalna s temperaturo. Pri visokorelativističnih trkih, se longitudinalna komponenta gibalne količne ne more enostavno termalizirati, zaradi velike asimetrije v začetnem stanju ($p_t = 0, p_l =$ gibalna količina žarka). Zato računamo le s transferzalnimi komponentami (merimo $\frac{\partial\sigma}{\partial p_t^2}$). Te so lahko v neposredno merilo za temperaturo sistema. Poleg tega razkrijejo kolektivni tok delcev in fazni prehod.

3.4 Čudni delci

V kemičnem ravnovesju je prisotnih veliko število različnih delcev, ki se pokoravajo Bolzmanovemu zakonu. Število čudnih kvarkov (s $\overline{s}$) se v PKG močno poveča, saj je njihova mirovna masa primerljiva s temperaturo. Produkcija u in d kvarkov pa je ovirana zaradi velikega števila teh kvarkov, ki so bili sproščeni iz nukleonov med trkom.

Zares so opazili večjo produkcijo delcev, ki vsebujejo čudne kvarke. Veliko različnih raziskovalnih skupin je izmerilo različne delce, ki vsebujejo en ali dva čudna kvarka (K^+,K^o,Λ,Ξ) in njihove antidelce. V večini primerov je njihova proizvodnja glede na pione večja od tiste pri reakcijah proton-proton za 2-5 krat.

4 Signali iz PKG

Postavlja se vprašanje kako sploh zaznati signale, ki bi nedvoumno dokazovali obstoj PKG?
Delci med katerimi deluje šibka interakcija, so edini neposredni vir informacij o PKG. Fotoni in leptonski pari (virtualni fotoni) naj bi se tvorili kot termalno sevanje iz segrete snovi in jih nadaljni razvoj sistema ne bi motil. Ker je njihov spekter zelo odvisen od temperature, bi bili občutljivi na prve-vroče faze razvoja. Na žalost pa je ozadje zelo močno, saj se takšni delci tvorijo tudi pri običajnih hadronskih razpadih. Do danes tega prvotnega sevanja niso opazili, saj eksperimentalne meje ($\gamma/\pi \leq$ 10-15 %) še niso dovolj visoke, da bi lahko opazili predvidevan pojav.

Signali ki izvirajo iz trdih sipalnih procesov na samem začetku reakcije, kot na primer rojevanje J/Ψ delcev, niso neposredno povezani s formacijo plazme, so pa pomembni kot orodje za otipavanje okolice snovi v PKG.J/Ψ delci naj bi se rojevali med primarnimi trki nukleon-nukleon, večinoma preko zlivanja gluonov. Pričakovali so zmanjšanjšano produkcijo teh delcev, ker naj bi bila sila, ki poveže čarobna kvarka v ta delec, zasenčena (podobno je zasenčena elektrostaska sila v plazmi ionov). Takšen pojav bi bil značilen za PKG, vendar J/Ψ ni šibko sodelujoč in razpade kar zaplete situacijo.

Tudi ta proces, ki se je zdel tipičen za PKG se je posrečil pojasniti z modelom goste hadronske snovi, v katerem ni stanja PKG. Vendar se napovedi obeh modelov razlikujeta pri večjih p_t in težjih čarobnih delcih. Žal danes nismo sposobni doseči dovolj visokih energij, da bi lahko opazili te razlike.

Znanstveniki so pričakovali mnogo čudnih delcev in njihovih antidelcev, ki naj bi se tvorili v PKG. Predvsem naj bi šlo za kaone in hipernone. Res so izmerili veliko količino teh čudnih delcev,vendar se je kasneje izkazalo da se pojav za mnoge delce lahko opiše z modelom zelo goste hadronske snovi. Kljub temu pa ima PKG prednost pred modelom goste hadronske snovi. Veliko produkcijo antibarionskih delcev (Ξ^-,$\overline{\Lambda}$) se namreč zelo težko pojasni v hadronskih modelih.

Vplazmi so možni tudi pojavi, kot so tvorba "kapljic"-stranglets, ki bi vsebovale čudne kvarke s ter kvarke u in d. Morda bi takšne kapljice bile stabilne. Velika produkcija čudnih kvarkov nudi možnost metastabilnih multičudnih objektov "memos". Takšne objekte bi tvorili večinoma hipernoni. Tako "memos" kot "strangelets" (slika 2) naj bi bili električno negativni ali nevtralni in bi jih v magnetnem polju lahko ločili od navadnih jeder. Žal teh eksotičnih pojavov še niso opazili.

4.1 Signal faznega prehoda

V PKG se rodi veliko število čudnih kvarkov, toda od poteka hadronizacije in do neke mere razširjanja sistema, bo odvisno število čudnih kvarkov, ki jih opazimo v čudnih hadronih. Prisotnost faznega prehoda (konstantna temperatura celotnega sistem, kjub različnim gostotam) se naj bi pokazala v odvisnosti povprečne vrednosti transferzalne komponente gibalne količine od gostote gostote energije.

4.2 Signal iz hadronskega plina

Razvoj in ohlajanje sistema po faznem prehodu, se opiše s hidrodinamskim modelom. Kolektivni tok spremeni drugače termalni spekter delcev, torej se informacija o toku skriva v porazdelitvi $p_t in m_t$ (transferzalna masa). Sistem se širi pretežno v longitudinalni smeri. Zaradi tega sta gibalna količina delcev in njihova kordinata močno korelirani. V principu se takšna korelacija izmeri s HBT.

5 Prihodnost in namen raziskav

Dokaz obstoja PKG bi nedvomno proslavil enčbo stanja jedrske snovi. Potrdil bi kvarkovsko sliko in nudil odgovor na fundamentalna vprašanja narave, kot je proces spontanega lomljenja simetrije, ki je odgovoren za nastanek kvarkov. Verjetno je fazno spremembo (PKG v hadronski plin) zgodnje vesolje prešlo v stotisočinki sekunde po velikem poku (slika 5). V astrofiziki bi tako bilo mogoče razložiti dinamiko supernov, skrivnost črne snovi ali stabilnost nevtronske zvezde, kjer je barionska gostota desetkrat večja kot v jedru. Domnevajo da so jedra nevronskih zvezd v stanju hladne PKG.

Lahko bi dejali, da je prva faza eksperimentov končana. Z današnjimi pospeševalniki ni moč narediti ekperimenta z znatno večjimi energijami/nukleon. Na obzorju se že kaže nova generacija eksperimentov. Morda bodo takrat prišle na dan kakšne nove teorije. Že naslednje leto si v SPS obetajo trkanje ^{208}Pb z energijo 160 GeV/nukleon v težiščnem sistemu. Po sedanjih teorijah bi pri teh eksperimentih morali doseči gostoto energije, ki bi dosegla ali celo presegla tisto v centru nevtronske zvezde. Večji volumen sistema, večje gostote enrgije in najpomembnejše daljši življenski čas, bodo prispevali h gotovemu ravnovesju, pa naj bo to ravnovesje hadronov ali kvarkov.

Do konca stoletja si lahko obetamo zelo velike gostote energij. Relativistični trkalnik težkih ionov (RHIC) bo omogočal trkanje ^{197}Au z ^{197}Au pri energiji 200 GeV/nukleon v težiščnem sistemu. Končali naj bi ga predvidoma do leta 1997. V CERNu načrtujejo LHC (Large Hadron Collider). To bo naprava s katero bo mogoče doseči skoraj neverjetnih 6.1 TeV/nukleon. Pričakujejo ogromno produkcijo delcev, "freeze-out" volumen okoli 100 000 fm^3 in začetno gostoto energije 50-100 krat večjo, kot jo ima jedrska snov. Če tudi bi se izkazalo, da se ne tvori ravnovesna PKG, gotovo tudi hadronska slika ne bi pojasnila stanja, ki bi ga dobili. V tej sliki bi bili hadroni naloženi eden na drugega celo več kot $10\frac{\pi}{fm^3}$. Torej bomo tako ali drugače prišli do neke nove fizike.

References

[1] NewScientist, J. Gribbin, 17 August 1991, 31

[2] Scientific American, H. Gutbor d in H. Stöcker, November 1991

[3] Poročilo iz konference v Dallasu 1993, Jürgen Schukraft, Searching for the quark-gluon plasma

[4] Particle Properties-Data Booklet, American institute of physics 1992