

## Raport științific

privind implementarea proiectului în perioada octombrie – decembrie 2011

În prezent nu există un semnal unic și clar al formării plasmei de cuarci și gluoni în ciocniri nucleu-nucleu la energii relativiste și ultrarelativiste. Una din principalele lecții care au fost învățate în acest domeniu captivant al Fizicii actuale este aceea că înțelegerea formării plasmei de cuarci și gluoni, studiul proprietăților ei se va face prin studii sistematice ale ciocnirilor nucleare relativiste. Astfel, este necesară măsurarea unor mărimi fizice specifice în ciocniri A+A la diferite energii disponibile și diferite tipuri de fascicule și trebuie comparate cu date experimentale de referință (ciocniri p+p/p+A la aceeași energie). Comparațiile sunt foarte importante deoarece ciocnirile p+p ne oferă procesele de bază, dar într-un mediu mai „curat” (particule produse mai puține), iar din ciocnirile d+A/p+A putem afla informații despre modificările proceselor de bază datorită prezenței materiei nucleare normale.

Printre semnalele experimentale de interes se numără semnalele cinematice. Ele se bazează pe determinarea densității de energie,  $\epsilon$ , a presiunii  $p$ , și a densității de entropie,  $s$ , mărimi care caracterizează materia hadronică densă și fierbinte, în funcție de temperatura  $T$ , și potențialul chimic barionic,  $\mu_B$ . În aceste dependențe se caută un salt rapid în numărul efectiv de grade de libertate, exprimat prin rapoartele  $\epsilon/T^4$  sau  $s/T^3$ , într-un interval determinat, relativ mic, de temperatură.

Observabilele experimentale măsurabile care sunt legate de variabilele termodinamice  $T$ ,  $s$  și  $\epsilon$  sunt impulsul transversal mediu  $\langle p_T \rangle$ , distribuția de rapiditate,  $dN/dy$ , și energia transversală,  $dE_T/dy$ . Astfel, se poate inversa diagrama  $\epsilon - T$  prin reprezentarea lui  $\langle p_T \rangle$  în funcție de  $dN/dy$  sau  $dE_T/dy$ . Dacă apare un salt rapid în numărul efectiv de grade de libertate, atunci ne așteptăm la o curbă de forma "S", a cărei trăsătură caracteristică esențială este saturarea lui  $\langle p_T \rangle$  în timpul fazei mixte, continuând apoi cu o altă creștere, după ce s-a făcut schimb structural de la singletul de culoare la constituenții colorați.

Van Hove a discutat, pentru prima dată, posibilitatea ca dependența impulsului transversal mediu în funcție de densitatea de rapiditate să reprezinte un posibil semnal al formării plasmei de cuarci și gluoni, considerând că densitatea de rapiditate  $dN/dy$  reflectă entropia sistemului, iar spectrul de impuls transversal este legat de temperatura sistemului și de expansiunea colectivă a materiei formată prin ciocnire [1].

Se poate considera că există o legătură între parametrul pantei inverse al spectrelor de impuls transversal și temperatura sistemului, deoarece forma exponențială a spectrelor apare ca o consecință a faptului că gazul hadronic produs în urma ciocnirii atinge starea de echilibru termic printr-o serie de ciocniri secvențiale între particulele formate în ciocnire și care alcătuiesc sistemul respectiv. Trebuie, însă, să se țină cont că, dacă sistemul format într-o ciocnire A+A termalizează prin ciocniri între particulele produse, particulele detectate în starea finală, deci și spectrele lor de impuls transversal, vor reflecta, în principal, fazele finale, mai reci, din evoluția sistemului, și nu vor da informații directe despre faza inițială, fierbinte a ciocnirii.

Am folosit datele experimentale achiziționate cu sistemul de detectori al Experimentului BRAHMS pentru a obține rezultate noi pentru studiul proprietăților materiei fierbinți și dense, departe de zona de rapiditate medie, la rapidități mari, și pentru a descoperi dacă mediul partonic produs prin ciocnire se extinde atât în zona centrală de rapiditate, cât și pe direcție longitudinală, spre rapidități mai mari. Am studiat densitatea de particule,  $dN/dy$ , în raport cu rapiditatea și centralitatea ciocnirii pentru a obține informații legate de mecanismele de producere de particule, atât în zona centrală de rapiditate, cât și la rapidități mai mari, în regiunile de fragmentare ale proiectilului și țintei.

Folosind spectrele de impuls transversal ale kaonilor pozitivi și negativi produși în cele mai centrale 0-10% ciocniri Au+Au la energia maximă disponibilă în sistemul centrului de masă la RHIC, cea de 200 A GeV, au fost obținute densitățile de rapiditate pentru următoarele intervale de rapiditate: (-0.1, 0.1), (0.8, 0.9), (2.7, 2.8), (2.8, 2.9), (2.9, 3.0), (3.0, 3.1), (3.1, 3.2), (3.2, 3.3), (3.3, 3.4), (3.4, 3.5), (3.5, 3.6). Spectrele au fost fit-ate cu următoarea formulă exponențială:



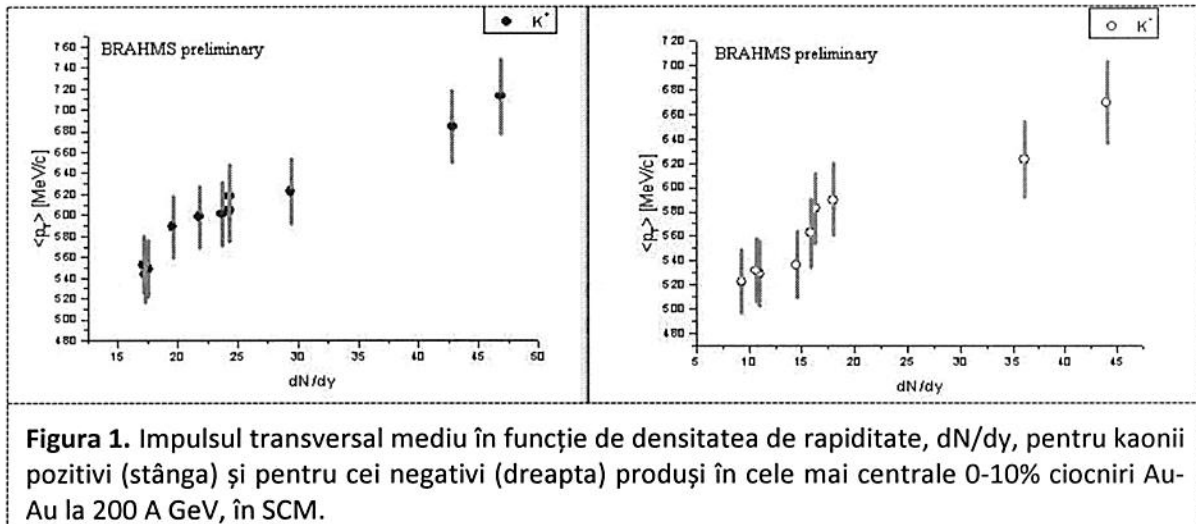
$$\frac{1}{2\pi p_T} \frac{d^2 N}{dp_T dy} = \frac{1}{2\pi T(T+m)} A \exp\left(-\frac{\sqrt{m^2 + p_T^2} - m}{T}\right),$$

unde  $T$  este parametrul pantei inverse (sau temperatura efectivă nucleară),  $m$  este masa de repaus a particulei. Densitățile de rapiditate corespunzătoare au fost calculate prin integrarea regiunii de impuls transversal acoperit experimental și, prin extrapolare, folosind funcția de fit în regiunile de impulsuri transversale situate în afara acceptanței experimentului (la impuls transversal mic,  $p_T < 0.5$  GeV/c și la impuls transversal mare,  $p_T > 2$  GeV/c). Media impulsului transversal pentru kaonii încărcăți se calculează astfel:

$$\langle p_T \rangle = \frac{\int_{p_T^{\min}}^{p_T^{\max}} p_T f(p_T) dp_T}{\int_{p_T^{\min}}^{p_T^{\max}} f(p_T) dp_T},$$

unde  $f(p_T)$  este funcția exponențială folosită. Analizând valorile impulsului transversal mediu pentru kaonii pozitivi și negativi produși în ciocniri Au+Au la 200 A GeV, în SCM, am constatat că această mărime scade din zona centrală a ciocnirii, la rapiditate  $y=0$ , caracterizată de temperatură mare și densitate de particule maximă, spre regiunile spectatoare, la rapidități mari, caracterizate de temperatură mică și mai puține particule produse.

Reprezentarea impulsului transversal mediu în funcție de densitatea de rapiditate,  $\langle p_T \rangle - dN/dy$ , este prezentată în Fig. 1.



Cele două puncte experimentale, de la  $y=0$  și  $y=0.85$ , pot fi legate de faza de plasmă de cuarci și gluoni din zona de rapiditate medie, adică din zona unde sistemul format prin ciocnire are cea mai mare temperatură și cea mai mare densitate de energie. Pe măsură ce rapiditatea crește, valorile lui  $\langle p_T \rangle$  și  $dN/dy$  descresc și pot fi interpretate în termenii existenței fazei mixte, de plasmă de cuarci și gluoni – gaz hadronic, din evoluția sistemului format în urma ciocnirii celor doi ioni grei relativști de Au. Punctele de la  $y \sim 3$  reflectă faza hadronică, deoarece la rapidități mari, lângă rapiditățile proiectilului și țintei, temperatura sistemului și densitatea de particule sunt mult mai mici decât în regiunea centrală de rapiditate și nu ne așteptăm la formarea plasmei de cuarci și gluoni în aceste regiuni.

Trebuie să ținem cont și de faptul că, distribuțiile de impuls transversal ale hadronilor produși în ciocnire nu reflectă condițiile din etapele timpurii ale ciocnirii și sunt influențate de curgerea colectivă a sistemului. Această curgere colectivă transversală este aditivă, se acumulează în toate etapele/fazele prin care trece materia nucleară formată prin ciocnire, adică este o medie peste întreaga evoluție temporală, din momentul ciocnirii și până la „îngheț” (freeze-out).



Dinamica ciocnirilor nucleare relativiste este determinată de geometria ciocnirii. De aceea, în stabilirea condițiilor generale necesare producerii unei anumite tranziții de fază este necesară considerarea influențelor geometriei și fluctuațiilor asupra tranzițiilor de fază. Se știe faptul că fluctuațiile pot să fie datorate geometriei, statisticii și dinamicii ciocnirii. În cazul experimentelor de la marile sisteme de acceleratori de tip collider de la BNL (RHIC) și CERN (LHC) fluctuațiile de geometrie, respectiv statistice, pot fi reduse considerabil. De aceea, este posibilă evidențierea clară a celor de tip dinamic prin observarea saltului descris anterior printr-o analiză eveniment cu eveniment. În plus, luând în considerare faptul că mecanismul de interacție principal în ciocniri nucleare relativiste este cel de tip hidrodinamic, se poate considera că analiza fluctuațiilor de tip dinamic pot să fie puse în legătură cu modificări în tipul de curgere hidrodinamică a materiei nucleare. De exemplu, se pot considera corelații între unghiul azimutal și pseudorapiditate/rapiditate între hadroni și se pot căuta ca surse ale corelațiilor formarea undelor de șoc, ceea ce presupune cuarci și gluoni cu impulsuri mari și forate mari. De asemenea, corelațiile dintre hadroni pot da informații despre interacțiile dintre jeturi și materia nucleară/mediul nuclear. Existența fluctuațiilor în pozițiile transversale – legate de armonice de diferite ordine, impare, de exemplu – pot fi determinate de împrăstieri hadronice ale nucleonilor, cu luarea în considerare a tipului de curgere. Rezultatele experimentale de până acum de la RHIC-BNL sunt legate de curgerea hidrodinamică a unui lichid aproape perfect. Includerea fluctuațiilor curgerii datorată fluctuațiilor de excentricitate în pozițiile transversale ar putea da unele explicații legate de comportarea rezultatelor experimentale. Dacă se consideră coeficienții de curgere de ordin superior și fluctuațiile lor, atunci există posibilitatea studierii constrângerilor asupra proprietăților de transport ale sistemului format prin ciocnire („fireball”-ului). O viitoare separare în rezultatele experimentale a contribuțiilor de la curgerea eliptică ( $v_2$ ), fluctuații și procese de alt tip decât curgerea hidrodinamică ar putea fi extrem de importantă în descrierea fazelor materiei nucleare fierbinți și dense. Unele clarificări asupra distribuțiilor de probabilitate pentru fluctuațiile în curgerea hidrodinamică a materiei nucleare vor fi necesare. Ca posibilă sursă de fluctuații pentru mărimea specifică curgerii eliptice,  $v_2$ , se poate considera existența fluctuațiilor în excentricitate a regiunii de suprapunere a nucleelor care se ciocnesc, precum și diferențelor dintre planul de reacție și planul participanților. Este important de subliniat faptul că astfel de surse pot fi mai ușor puse în evidență în ciocniri nucleu-nucleu asimetrice (a se vedea și rezultate ale grupului la energii mai joase, pentru astfel de ciocniri, la energiile specifice Sincrofazonului de la IUCN Dubna, Rusia). În ceea ce privește alte procese, cum ar fi cele legate de producerea jeturilor și formarea rezonanțelor de diferite tipuri, corelațiile pot stabili apartenența lor la procese de tip necurgere. Problema realizării de ciocniri asimetrice nucleu-nucleu poate ajuta la considerarea unei configurații triangulare în procesul de curgere. În acest sens, la BNL s-a propus considerarea de ciocniri asimetrice noi, de tip Au-Ag, Au-Cu, Au-Si ș.a., pe lângă „clasicele” ciocniri d-Au.

O cale importantă de investigare a fazelor materiei nucleare fierbinți și dense formate prin ciocniri nucleare relativiste și ultrarelativiste este cea a studierii producerii de antinuclee în regiunea de suprapunere a nucleelor care se ciocnesc.

În această primă etapă a proiectului se propune realizarea unui sistem integrat de acces și analiză al bazelor de date experimentale/simulate și de acces la surse de documentare și informare. Datele experimentale disponibile pentru grupul de cercetare sunt obținute în experimentele BRAHMS (RHIC-BNL), SKM (Sincrofazon-IUCN, Dubna), dar și date obținute folosind codurile de simulare UrQMD, HIJING, PLUTO, PHYTIA, etc. Sursele de documentare sunt alcătuite din manuale ale aplicațiilor folosite, informații despre proveniența, calitatea, versiunea, comentarii specifice surselor de date, alte documente care furnizează informații mai generale referitoare la ciocnirile ionilor grei la energii relativiste, cum ar fi articole științifice, cărți, comunicări științifice, etc. Acest sistem va furniza acces informativ prin intermediul paginilor de internet, dar și acces complet la sursele de date pentru aplicațiile utilizate. Unitățile de bază ale acestui sistem sunt constituite din cataloage implementate într-o bază de date de tip MySQL, pentru acces rapid la informațiile conținute. O componentă de bază a sistemului o constituie și realizarea interfeței de comunicare cu sistemul de calcul distribuit disponibil sub formă de fermă de calcul.

Experimentele din Fizica ciocnirilor ionilor grei la energii relativiste se caracterizează prin fluxuri mari de date care se păstrează în unitățile cu capacitate mare de stocare. Analiza datelor se efectuează după ce datele primare trec prin transformări succesive, și anume:



1. *Etapa traiectoriilor locale: datele brute, sub forma informațiilor primare furnizate de detectori – ca semnale electrice, în marea majoritate a cazurilor, sunt transformate în informații locale despre particulele care au traversat mediul activ al detectorilor și au interacționat cu acesta („hit”-uri). Acestea conțin informații specifice fiecărui detector: spațiale, temporale, amplitudinea semnalului, etc. Pentru detectorii care sunt folosiți la reconstrucția traiectoriilor particulelor, în această etapă, sunt combinate interacțiile („hit”-urile) pentru obținerea traselor locale.*

2. *Etapa traiectoriilor globale: traiectoriile locale din etapa anterioară sunt analizate și se construiesc traiectoriile globale, prin combinarea traselor locale din mai mulți detectori, și utilizarea câmpurilor magnetice pentru determinarea impulsului particulei, care a traversat întregul sistem de detectori. În general, informațiile de tip temporal, care permit identificarea particulei, sunt copiate și stocate, fără a mai suferi alte transformări.*

3. *Etapa datelor finale: traiectoriile globale, care au asociate impulsurile particulelor, sunt combinate cu „hit”-urile care conțin informații temporale, din detectorii cu timp de zbor. În această etapă sunt disponibile toate informațiile necesare pentru identificarea particulelor, prin masă și impuls.*

*Pentru analiza datelor experimentale sunt suficiente datele obținute în ultima etapă. În acest caz, responsabilitatea utilizatorului final constă în scrierea de aplicații care să selecteze procese cu semnificație fizică în vederea valorificării rezultatelor. Este important ca utilizatorul să aibă o imagine de ansamblu asupra tuturor datelor disponibile în sistem, în vederea analizării sistematice a datelor experimentale referitoare la energia și tipul de ioni folosiți, tipul de aranjament al detectorilor în timpul achiziției de date experimentale, cum ar fi: unghiuri ale spectrometrelor, valori ale câmpurilor magnetice utilizate, cantitate de date disponibilă, precum și alte informații ca numărul de evenimente semnificative pentru un tip de analiză: particule cu impuls mare, număr de evenimente disponibile, în condiții minime de declanșare, mod de accesare a datelor experimentale, localizarea datelor în sistemul de stocare permanent ș.a.*

*În măsura în care reducerea datelor experimentale se efectuează în mod automat, utilizatorul trebuie să facă și o selecție a particulelor în funcție de mărimi globale, care să caracterizeze calitatea datelor (densitate de particule pe număr de evenimente, eficiența detectorilor în timp, etc) pentru înlăturarea oricăror inconsistențe de funcționare ale detectorilor, neidentificate până în momentul analizei.*

*Datele obținute în urma execuției codurilor de simulare prezintă pentru sistem o complexitate redusă față de datele experimentale. Informațiile necesare pentru caracterizarea unei surse de date se rezumă la energia și tipul ciocnirii, codul de simulare folosit, numărul de evenimente simulate, opțiunile specifice codului de simulare și localizarea datelor în sistemul de stocare permanent. În cazul codurilor de simulare, efortul integrării în sistem se materializează prin asigurarea unui format de date unitar și comprimarea datelor în vederea minimizării spațiului alocat. În acest sens se utilizează un standard comun Fizicii nucleare a ionilor grei la energii relativiste, standardul ROOT, bazat pe conceptul "Tree" indexat, care permite accesul rapid la date, la un nivel ridicat de compresie al datelor.*

*Sistemul integrat global își propune să furnizeze utilizatorului toate informațiile enunțate pentru o analiză de calitate a datelor din sistem, sub forma de rapoarte ale datelor experimentale și informații despre accesul la aceste date.*

*În interfața de acces în sistem, utilizatorul specifică date referitoare la tipul de ciocnire selectat (energie, tip de ioni), unghiurile spectrometrelor și numărul versiunii de date dorite. Sistemul furnizează informațiile referitoare la locația datelor cerute, numărul versiunii fișierelor, precum și un sumar al calității datelor interogate (Bun/Prost/Incert). O altă interfață a sistemului permite obținerea de informații mai detaliate asupra calității datelor, sub forma de histograme ale variației în timp a semnalului de la detectori, precum și imagini globale pertinente ale fiecărei etape din reconstrucție. Prin analiza informației temporale prezentate sub forma pătratului masei particulelor în funcție de impuls, utilizatorul decide asupra calității calibrării datelor, și poate decide, eventual, refacerea calibrărilor sau omiterea datelor din analiză. Pentru fiecare unitate a datelor experimentale, se prezintă spectrele invariante ale particulelor detectate raportate la cele ale întregului set de date. Utilizatorul obține, astfel, suficiente informații despre datele pe care le dorește, și poate decide schimbarea calității unei submulțimi de date. Această operație se efectuează de către sistem prin aceeași interfață web. Ulterior, aplicația finală consultă câmpurile de calitate și adaugă/înlătură în mod automat datele asociate analizei finale.*



În urma selecției datelor experimentale, utilizatorul înregistrează comanda de execuție asociată analizei în sistemul de calcul distribuit al sistemului global, iar prin interfața de monitorizare este informat permanent asupra stadiului în care se află analiza.

În cazul datelor obținute cu codurile de simulare, interfața de sistem permite utilizatorului identificarea seturilor de date simulate pe care urmează să le compare cu datele experimentale. Interfața permite execuția directă a codurilor de simulare pentru obținerea unor noi seturi de date, prin înregistrarea și monitorizarea comenzii în sistemul de calcul distribuit. La finalizarea procesului de obținere a datelor simulate, sistemul se actualizează automat și utilizatorul este informat de adăugarea unui nou set de date în sistem.

*Interfața de documentare permite accesul utilizatorului la bibliografia selectivă.*

Director proiect,

Prof.univ.dr. Alexandru JIPA



### Referințe bibliografice

- [1]. L. Van Hove- Phys. Lett. B118, 138 (1982)
- [2]. B. Mohanty- Exploring the QCD landscape with high-energy nuclear collisions, nucl-exp/1102.2495
- [3]. M. Gyulassy - Lectures on the theory of high energy A+A collisions at RHIC, Preprint: nucl-ex/arXiv:0106072v1.pdf
- [4]. C. Salgado- Lectures on high-energy heavy ion collisions at the LHC facilities for the energy frontier of nuclear physics, Preprint: nucl-ex/arXiv:09071219v1.pdf
- [5]. S. Voloshin- Collective phenomena in ultrarelativistic nuclear collisions, Preprint: nucl-ex/arXiv: 1111.7241v1.pdf
- [6]. B. Alver, G. Roland - Phys. Rev. C81, 054905(2010)
- [7]. K. Aamodt et al (ALICE Collaboration)- Phys. Rev.Lett. 107, 032301 (2011)
- [8]. B. I. Abelev et al (STAR Collaboration)- Phys.Rev. Lett. 102, 052302 (2009)
- [9]. B. I. Abelev et al (STAR Collaboration)- Phys.Rev. Lett. 105, 022301 (2010), B. I. Abelev et al (STAR Collaboration) - Phys. Rev. C80, 064912(2009)
- [10]. K. Aamodt et al (ALICE Collaboration)- [arXiv:1109.2501,nucl-ex]
- [11]. Md. Rihan Haque, Md. Nasim, and Bedangadas Mohanty- Elliptic and Triangular flow in asymmetric heavy-ion collisions- arXiv:1111.5095v1 [nucl-ex]
- [12]. V. Roy, A. K. Chaudhuri- [arXiv:1109.1630 [nucl-th]]; B. Schenke, S. Jeon, C. Gale, Phys. Rev. Lett.106,042301 (2011)
- [13]. J. Y. Ollitrault, A. M. Poskanzer, S. A. Voloshin- Phys. Rev. C80, 014904 (2009)
- [14]. Jan Fiete Grosse-Oetringhaus (for the ALICE Collaboration)- J.Phys.G: Nucl.Part.Phys.38(2011)124028 (9pp)- Hadron correlations in Pb–Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with ALICE
- [15]. J Schukraft (for the ALICE Collaboration)- J.Phys.G: Nucl.Part.Phys.38(2011)124003 (7pp)- ALICE results from the first Pb–Pb run at the CERN-LHC
- [16]. Peter Steinberg (for the ATLAS Collaboration)- J.Phys.G: Nucl.Part.Phys.38(2011)124004 (8pp)- Recent heavy-ion results with the ATLAS detector at the LHC
- [17]. Bolek Wyslouch (for the CMS Collaboration)- J.Phys.G: Nucl.Part.Phys.38(2011)124005 (8pp)- Overview of experimental results in Pb–Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV by the CMS Collaboration
- [18]. Natasha Sharma (for the ALICE Collaboration)- J.Phys.G: Nucl.Part.Phys.38(2011)124189 (4pp)- Production of nuclei and antinuclei in pp and Pb–Pb collisions with ALICE at the LHC
- [19]. Ilya Selyuzhenkov for the ALICE Collaboration- Anisotropic flow and other collective phenomena measured in Pb-Pb collisions with ALICE at the LHC- arXiv: 1111.1875v1 [nucl-ex], 8 Nov 2011
- [20]. Amir H. Rezaeian- Charged particle multiplicities in pA interactions at the LHC from the CGC- arXiv: 1111.2312v1 [hep-ph], 9 Nov 2011
- [21]. L. Ya. Glozman, V.K. Sazonov and R. F. Wagenbrunn- Chiral restoration phase transition within the quarkyonic matter arXiv: 1111.0949v1 [hep-ph] 3 Nov 2011
- [22]. Owe Philipsen- Status of the QCD phase diagram from lattice calculations, arXiv:1111.5370v1 [hep-ph] 22 Nov 2011