



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΛΙΝΙΚΩΝ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕ CARLO ΠΑΚΕΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ GATE

Διπλωματική εργασία

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΚΑΡΑΚΑΤΣΑΝΗΣ

Επιβλέπων : Κωνσταντίνα Σ. Νικήτα
Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2005



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΛΙΝΙΚΩΝ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕ CARLO ΠΑΚΕΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ GATE

Διπλωματική εργασία

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΚΑΡΑΚΑΤΣΑΝΗΣ

Επιβλέπων : Κωνσταντίνα Σ. Νικήτα
Καθηγήτρια ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2^α Νοεμβρίου 2005.

.....
Κων. Σ. Νικήτα
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Δ. Κουτσούρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2005

Νικόλαος Α. Καρακατσάνης
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Νικόλαος Καρακατσάνης 2005
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η ανίχνευση των βασικών χημικών δυσλειτουργιών σε ένα βιολογικό σύστημα κατά την διάρκεια των πρώτων σταδίων εξέλιξης τους αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα για την επιλογή της πιο επιλεκτικής και κατάλληλης θεραπείας μιας πάθησης. Οι τεχνολογίες απεικόνισης αξιοποιούν την πιο ανεπτυγμένη αίσθηση του ανθρώπου, την όραση, με σκοπό την αναζήτηση, ανίχνευση και διάγνωση μιας βιοχημικής δυσλειτουργίας. Η Τομογραφία Εκπομπής Ποζιτρονίων παρέχει τα μέσα για την απεικόνιση των ρυθμών εξέλιξης των βιολογικών διαδικασιών *in vivo*. Ο υπολογισμός αυτών των ρυθμών επιτυγχάνεται μέσω της ολοκλήρωσης δύο σπουδαίων πρόσφατων τεχνολογιών: της μεθόδου εκτίμησης των χαρακτηριστικών κίνησης του ιχνηθέτη και της υπολογιστικής τομογραφίας (CT). Η κατανομή του ιχνηθέτη στο εσωτερικό ενός ιστού παρέχεται από ένα απεικονιστικό σύστημα PET με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας τρισδιάστατης εικόνας ανατομικής κατανομής της υπό μελέτη βιολογικής διαδικασίας.

Επομένως η Τομογραφία Εκπομπής και ιδιαίτερα το PET αποκτούν ταχύτατα έναν σημαντικό ρόλο στην θεραπεία και διάγνωση της σύγχρονης Ιατρικής. Παράλληλα, οι σημερινές προδιαγραφές που αφορούν ποιότητα εικόνας, ακρίβεια και ταχύτητα επεξεργασίας έχουν αυξημένες απαιτήσεις. Και οι δύο αυτοί παράγοντες οδήγησαν σε μια τεράστια αύξηση των ερευνητικών προσπαθειών στο χώρο της Πυρηνικής Ιατρικής Απεικόνισης. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo (MC) αποδείχθηκε ότι αποτελούν ένα απαραίτητο και αποτελεσματικό εργαλείο για τις δυνατότητες σύγχρονης και μελλοντικής ανάπτυξης της τομογραφίας εκπομπής, ιδιαίτερα ύστερα από την αύξηση της διαθεσιμότητας υπολογιστικών συστημάτων παράλληλης αρχιτεκτονικής (clusters).

Επομένως οι προσομοιώσεις Monte Carlo μπορούν να αξιοποιηθούν από την Πυρηνική Ιατρική με στόχο την σχεδίαση νέων ιατρικών συστημάτων απεικόνισης, την βελτιστοποίηση πρωτοκόλλων απόκτησης δεδομένων, την ανάπτυξη και αξιολόγηση αλγορίθμων ανακατασκευής της εικόνας και τεχνικές διόρθωσης σκέδασης έτσι ώστε να βελτιωθεί η διαδικασία ποσοτικοποίησης της εικόνας. Το GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission) αποτελεί μια πλατφόρμα λογισμικού βασισμένη στον αλγόριθμο γενικού σκοπού (general purpose) GEANT4 και έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ικανοποιεί τις ειδικές ανάγκες των εφαρμογών PET/SPECT. Ενσωματώνει τις βιβλιοθήκες του Geant4 σε ένα σύνολο από εργαλεία το οποίο είναι καλά δομημένο, έχει την δυνατότητα προσαρμογής σε πολλές εφαρμογές και ορίζεται με την χρήση μακροεντολών. Το GATE περιλαμβάνει εξειδικευμένες μονάδες οι οποίες είναι απαραίτητες για την εκτέλεση ρεαλιστικών προσομοιώσεων όπως μονάδες διαχείρισης χρόνου ή διαδικασιών με χρονική εξάρτηση (π.χ. κινήσεις ανιχνευτών και πηγών, ραδιενεργές εκπομπές και δυναμικές λήψεις δεδομένων), σύνθετες κατανομές πηγών ακτινοβολίας και απλή περιγραφή της γεωμετρίας του συστήματος ανίχνευσης. Η ικανότητα συγχρονισμού όλων των χρονικά εξαρτώμενων τμημάτων της προσομοίωσης επιτρέπει μια σαφή περιγραφή της διαδικασίας λήψης δεδομένων και παράλληλα αποτελεί ένα από τα πιο πρωτοποριακά χαρακτηριστικά του GATE. Το πρόγραμμα GATE είναι ανοιχτού κώδικα (Open Source) ενώ η ανάπτυξη κι επικύρωση του πραγματοποιούνται από τα μέλη του OpenGATE Collaboration. Για τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκε το GATE ως το εργαλείο προσομοίωσης αυτής της εργασίας.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εισαγωγική παρουσίαση του σημαντικού ρόλου που διαδραματίζουν οι τεχνικές προσομοίωσης στον τομέα της Πυρηνικής Ιατρικής όπως επίσης και της ανάλυσης της διαδικασίας προσομοίωσης του εμπορικά διαθέσιμου PET συστήματος ECAT EXACT HR+ της Siemens, με χρήση του πακέτου προσομοίωσης GATE. Ο κώδικας της προσομοίωσης θα αξιοποιηθεί για την βελτιστοποίηση των πρωτοκόλλων λήψης δεδομένων και την μελέτη φαινομένων σκέδασης καθώς και των επιπτώσεών τους στην επίδοση του συστήματος. Επίσης τα ημιτονόγραμμα των δεδομένων εξόδου του GATE θα εισαχθεί στο πακέτο λογισμικού ανακατασκευής STIR (Software for Tomography Image Reconstruction) έτσι ώστε να αξιολογηθεί η ποιότητα και η αντίθεση της εικόνας που παράγει το μοντέλο προσομοίωσης της HR+. Επιπλέον, σε δεύτερη φάση, θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα του ημιτονογράμματος για την αξιολόγηση και βελτιστοποίηση των επαναληπτικών αλγορίθμων ανακατασκευής που χρησιμοποιήθηκαν.

Η γεωμετρία τους συστήματος περιγράφεται πλήρως με χρήση του GATE. Η ενεργειακή και χωρική διακριτική ικανότητα που ορίζει ο κατασκευαστής λαμβάνεται υπόψη. Μοντελοποιήθηκαν τέσσερις απλές πειραματικές διατάξεις: μια σημειακή ή μια γραμμική πηγή στο κέντρο του πεδίου οράσεως του συστήματος στο εσωτερικό ενός phantom από αέρα ή νερό.. Μελετήθηκαν οι ακόλουθες παράμετροι: ενεργειακά φάσματα, τρισδιάστατοι χάρτες θέσεων ανίχνευσης συμβάντων, κατανομές γωνιακής απόκλισης και κινητική ενέργεια ποζιτρονίων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αξιολογήθηκαν με βάση τα αναμενόμενα από το πραγματικό σύστημα αποτελέσματα . και παρατηρήθηκε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ τους.

Η προσομοίωση εμπορικών συστημάτων απεικόνισης με το GATE αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για την μελέτη φαινομένων σκέδασης και κινήσεων ασθενή. Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι ο κώδικας προσομοίωσης που υλοποιήθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ακριβή μοντελοποίηση πιο σύνθετων πειραματικών διατάξεων. Ο επόμενος στόχος είναι η χρήση διακριτοποιημένων phantom και δεδομένων από ασθενείς έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η διόρθωση σκέδασης και κινήσεων ασθενή στους αλγόριθμους ανακατασκευής, βελτιώνοντας έτσι την ποσοτικοποίηση των κλινικών εικόνων PET.

Όροι κλειδιά: Τομογραφία Εκπομπής Ποζιτρονίων, PET, ιχνηθέτης, μοντελοποίηση, προσομοίωση, Πυρηνική Ιατρική Απεικόνιση, Πυρηνική Ιατρική, ημιτονόγραμμα, ανακατασκευή, σύστημα απεικόνισης, GATE, επαναληπτικοί αλγόριθμοι.

Abstract

Detection of basic chemical abnormalities within a biological system during their first evolution stages is very crucial in selecting the most versatile, highly adaptive and specialized treatment of an illness. Imaging technologies take advantage of the most developed human sense, the vision, in order to search, detect and diagnose a biochemical abnormality. Positron Emission Tomography (PET) provides the means for the imaging of the evolving rates of biological processes in vivo. The calculation of those rates is achieved through the integration of two important recent technologies: the tracer assay kinetic method and the computed tomography (CT). The distribution of the tracer inside a tissue is being provided by a PET imaging system and the final result is a three-dimensional (3D) image of the anatomical distribution of the studied biological process.

Therefore Emission Tomography and especially PET have a fast growing importance in modern medicine for both diagnostic and treatment purposes. In addition, nowadays the specifications concerning imaging quality, accuracy and speed are highly demanding. Both of these factors cause a vast increase of the research efforts in the field of Nuclear Medical Imaging. Monte Carlo (MC) simulations proved to be an essential and effective tool for current and future emission tomography development, especially now, because of the fact that more powerful computer clusters became available.

As a result MC simulations can be used in Nuclear Medicine in order to design new medical imaging systems, optimize acquisition protocols and develop and assess image reconstruction algorithms and scatter correction techniques so as to improve image quantification. GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission) is a generic Monte Carlo simulation platform based on a general purpose code GEANT4 and specially designed to accommodate the specific needs of PET/SPECT applications. It incorporates the Geant4 libraries in a modular, versatile, and scripted simulation toolkit which is adapted to the field of nuclear medicine applications. GATE includes specific modules necessary to perform realistic simulations including modules managing time and time-dependent processes (detector and source movements, radioactive decay and dynamic acquisitions), complex source distributions and easy description of scanner geometry. The ability to synchronize all time-dependent components allows a coherent description of the acquisition process and is one of the most innovative features of GATE. GATE is an Open source software and its development and validation is carried out by members of the OpenGATE collaboration.

The purpose of this thesis is to make an introductory presentation of the importance of simulation techniques in the field of Nuclear Medicine as well as the analysis of the simulation process of commercial available PET scanner Siemens ECAT EXACT HR+, using GATE simulation package. The simulation code can be used in order to optimize data acquisition protocols and study scatter phenomena and their impact on the performance of the scanner. Furthermore the sinogram format of the output data of GATE simulation are going to be imported to STIR (Software for Tomographic Image Reconstruction) reconstruction package so as to evaluate the image quality and contrast of the images produced by the modelled HR+. The produced simulation results can be used for the assessment and optimisation of iterative reconstruction algorithms.

The geometry of the system components has been described in GATE, including detector ring, crystal blocks, PMTs etc. The energy and spatial resolution of the scanners as given by the manufacturers have been taken into account. Simple sources have been modelled; a point source and a line source placed in the middle of the field of view of the scanner in the air and in water as well. Several parameters have been studied, including energy spectrum, 3D concentration maps of detected events, acolinearity angle distributions and positron kinetic energies. The simulation results have been evaluated with respect to the results expected from a real system, and a good agreement has been observed.

The simulation of commercial scanners with GATE provides a very useful tool for the study of scatter and patient motion phenomena. The results indicate that the implemented simulation code can be easily used in order to accurately model more complicated experimental geometries. The use of phantoms and patient data will be a next step in order to include corrections of scatter and patient motion in reconstruction algorithms, thus improving quantification in clinical PET studies.

Key terms: Positron Emission Tomography, tracer assay kinetic, PET tracers, PET, SPECT, Monte Carlo, MC simulations, modeling, Nuclear Medical Imaging, Nuclear Medicine, Geant4, reconstruction, STIR, ECAT EXACT HR+, quantification, iterative algorithms.

Ευχαριστίες

Σύμβουλος καθηγήτρια στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν η κ. Κωνσταντίνα Νικήτα. Θα ήθελα να την ευχαριστήσω θερμά για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής και για την ευκαιρία που μου δόθηκε μέσω αυτής να αποκτήσω πολλές γνώσεις πάνω σε σύγχρονα θέματα τεχνολογιών προσομοίωσης απεικονιστικών συστημάτων Πυρηνικής Ιατρικής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον διδάκτορα Γιώργο Λούντο για την συνεχή και πολύτιμη υποστήριξη και καθοδήγησή του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής.

Ακόμη πολύτιμη ήταν και η συμβολή των υποψήφιων διδασκόντων Σακέλλιου Νικολάου και Μπούκη Σπύρου στην επίλυση όσων δυσκολιών παρουσιάστηκαν. Η απαντήσείς τους στις σχετικές απορίες μου, διευκόλυναν σημαντικά το έργο μου.

Τέλος δεν θα μπορούσα να μην αποδώσω ιδιαίτερες ευχαριστίες και στην Γκάβου Γεωργία για τις εύστοχες παρατηρήσεις της στο τελικό κείμενο καθώς επίσης και για την διαρκή ενθάρρυνσή της όλο αυτό το διάστημα..

Καρακατσάνης Νικόλαος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1	17
1.1 Μοντελοποίηση συστημάτων	17
1.2 Προσομοίωση με χρήση μεθόδων Monte Carlo	18
1.3 Συστήματα ιατρικής πυρηνικής τομογραφικής απεικόνισης	19
1.4 Νέες δυνατότητες προσομοίωσης	20
Κεφάλαιο 2	22
2.1 Επισκόπηση του PET	22
2.2 Παραγωγή Ραδιοϊσοτόπων	23
2.2.1 Λειτουργία κύκlotρου (Cyclotron Operation)	24
2.2.2 Το Carousel	25
2.2.3 Θάλαμος-στόχος (Target Chamber)	26
2.2.4 Μονάδα Ελέγχου H/Y	27
2.3 Βιοσύνθεση Ραδιονουκλετιδίων	27
2.3.1 Ιχνηθέτες PET (PET Tracers): Δομή και Λειτουργίες	27
2.4 Πυρηνική Φυσική και Τομογραφία	30
2.4.1 Εκπομπή Ποζιτρονίου και Ανακατασκευή Εικόνας	30
2.5 Instrumentation and Quality Control	34
2.5.1 Απαιτήσεις διακριτικής ικανότητας (Resolution Requirements)	34
2.5.2 Επίδοση ρυθμού μέτρησης (Count Rate Performance)	36
2.5.3 Λογισμικό λήψης δεδομένων (Acquisition Software)	36
2.5.4 Λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων (Processing Software)	37
2.5.5 Data Flow and Archiving	37
2.5.6 Εμφάνιση δεδομένων εικόνας (Display of Image Data)	38
2.5.7 Σφάλματα Υλικού (Hardware Artefacts)	38
2.6 Εφαρμογές της τεχνολογίας απεικόνισης PET	39
2.7 Σύγκριση τομογραφίας εκπομπής με άλλες τεχνολογίες απεικόνισης	41
Κεφάλαιο 3	42
3.1 Εισαγωγή	42
3.1.1 Πλεονεκτήματα σε σύγκριση με εναλλακτικά πακέτα λογισμικού προσομοίωσης	42
3.1.2 Ιστορική αναδρομή	43
3.2 Επισκόπηση της αρχιτεκτονικής του GATE	44
3.3 Αρχιτεκτονική προσομοίωσης στο GATE	45
3.3.1 Διεπαφή χρήστη: η γλώσσα μακροεντολών	45
3.4 Εργαλεία οπτικοποίησης	46
3.4.1 Οπτικοποίηση με το OpenGL	46
3.5 Ορισμός γεωμετρίας	47
3.5.1 Ο κόσμος της προσομοίωσης (world)	47
3.5.2 Δημιουργία αντικειμένου στο GATE	48
3.5.3 Περιγραφή αντικειμένου	53
3.5.4 Αναπαραγωγή αντικειμένου	53
3.5.5 Τοποθέτηση αντικειμένου στο χώρο	56
3.5.6 Μετακίνηση αντικειμένου (movement)	58
3.6 Ορισμός συστήματος	58
3.6.1 Επιλογή συστήματος	58

3.6.2	Σύνδεση γεωμετρικών στοιχείων με ένα σύστημα	60
3.7	Σύνδεση sensitive detector	63
3.7.1	Σύνδεση του crystalSD	63
3.7.2	Σύνδεση του phantomSD	64
3.8	Φυσικές διεργασίες	64
3.8.1	Μοντέλο φυσικών διεργασιών	64
3.8.2	Αλλαγή φυσικής διεργασίας	65
3.8.3	Αρχικοποίηση της γεωμετρίας και των φυσικών διεργασιών	65
3.9	Ορισμός ενεργότητας και πηγών	65
3.9.1	Δημιουργία πηγής	66
3.9.2	Διακριτοποιημένες πηγές	69
3.10	Μονάδα ψηφιοποίησης (digitizer)	69
3.10.1	Περιγραφή λειτουργίας	70
3.10.2	Μονάδες digitizer	72
3.11	Δεδομένα εξόδου	78
3.11.1	Τύπος δεδομένων εξόδου ROOT	79
3.11.2	Ημιτονόγραμμα (Sinogram Output)	80
3.11.3	Τύπος εξόδου ECAT7	82
3.12	Ιδιότητες υλικών	84
3.12.1	Βάση δεδομένων υλικών	84
3.12.2	Τροποποίηση της βάσης δεδομένων υλικών	85
Κεφάλαιο 4		89
4.1	Γενική αρχιτεκτονική προσομοίωσης	89
4.2	Λεπτομέρεια και οπτικοποίηση	90
4.2.1	Λεπτομέρεια (verbosity) εκτέλεσης της προσομοίωσης	90
4.2.2	Οπτικοποίηση (Visualization)	90
4.2.3	Τυχαίοι αριθμοί στο GATE (Random)	92
4.3	Σύστημα ecats	93
4.3.1	Περιγραφή του συστήματος ecats	93
4.3.2	Εφαρμογή του συστήματος ecats	93
4.4	Βήμα προς βήμα υλοποίηση της προσομοίωσης	96
4.4.1	Πρώτο βήμα: Οπτικοποίηση, Λεπτομέρεια και Ορισμός της Γεωμετρίας	97
4.4.2	Δεύτερο βήμα: Ορισμός της γεωμετρίας του phantom	104
4.4.3	Τρίτο βήμα: Σύνδεση γεωμετρίας με sensitive detectors	107
4.4.4	Τέταρτο βήμα: Ρύθμιση των φυσικών διαδικασιών	108
4.4.5	Πέμπτο βήμα: Αρχικοποίηση	110
4.4.6	Έκτο βήμα: Ρύθμιση του ψηφιοποιητή (digitizer)	110
4.4.7	Έβδομο βήμα: Ρύθμιση πηγής προσομοίωσης	112
4.4.8	Βήμα όγδοο: Ορισμός δεδομένων εξόδου	114
4.4.9	Ένατο βήμα: Καθορισμός της μεθοδολογίας λήψης δεδομένων	116
4.5	Επεξεργασία και παρουσίαση αποτελεσμάτων	118
4.5.1	Σχεδίαση πειραμάτων	118
4.5.2	Ανάλυση αποτελεσμάτων	120
4.5.3	Μελλοντικός πειραματικός σχεδιασμός	135
Κεφάλαιο 5		139
5.1	Γενική επισκόπηση εξελίξεων	139
5.2	Εξέλιξη και νέες δυνατότητες του GATE	140
5.2.1	Βελτιώσεις του τμήματος ψηφιοποίησης (digitizer)	141
5.2.2	Ενταμιευτές μνήμης (memory buffers) και εύρος ζώνης (bandwidth)	144
5.2.3	Πολλαπλές αλυσίδες επεξεργασίας	145

5.2.4	Ταξινόμηση συμπτώσεων	146
5.2.5	Ταξινόμηση πολλαπλών συμπτώσεων (multiple coincidence sorter).....	150
5.2.6	Χειρισμός και φιλτράρισμα συμπτώσεων	152
5.3	Εφαρμογή των νέων δυνατοτήτων του GATE	154
Παράρτημα Α		156
Βιβλιογραφία		170

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 : Σύστημα διανομής ραδιοισοτόπων (RDS).....	23
Εικόνα 2.2: Κύκλοτρο 1.....	24
Εικόνα 2.3 : Κύκλοτρο 2	24
Εικόνα 2.4Κύκλοτρο 3.....	25
Εικόνα 2.5 : Κύκλοτρο και Carousel.....	25
Εικόνα 2.6 Carousel	26
Εικόνα 2.7 Θάλαμος στόχος.....	26
Εικόνα 2.8 : Μονάδα βιοσύνθεσης ραδιονουκλεοτιδίων.....	27
Εικόνα 2.9: Ραδιοσότοπο	30
Εικόνα 2.10 Μέγιστο βεληνεκές ποζιτρονίου.....	31
Εικόνα 2.11 : Αλληλεπίδραση ηλεκτρονίου με ποζιτρόνιο	31
Εικόνα 2.12 Σχηματισμός του positronium.....	31
Εικόνα 2.13 : Εξάλωση.....	32
Εικόνα 2.14 : Θέση συμβάντος ως προς τον τομογράφο.....	32
Εικόνα 2.15: Σχηματική αναπαράσταση της μετατροπής των φωτονίων σε ηλεκτρόνια στους ανιχνευτές του συστήματος απεικόνισης	33
Εικόνα 2.16: Σχηματική αναπαράσταση του δακτυλίου των ανιχνευτών.....	33
Εικόνα 2.17: Μονοπάτια δειγματοληψίας μορφής fan beam	34
Εικόνα 2.18: Παράλληλα μονοπάτια δειγματοληψίας	34
Εικόνα 2.19: Ανακατασκευή εικόνας.....	34
Εικόνα 2.20 Αποθήκευση ροής δεδομένων.....	37
Εικόνα 2.21 Ανίχνευση συμπτώσεων στην περίπτωση παράλληλων μονοπατιών δειγματοληψίας.....	39
Εικόνα 2.22: Ανίχνευση συμπτώσεων στην περίπτωση μονοπατιών δειγματοληψίας σχήματος fan beam.....	39
Εικόνα 3.1 : Αρχιτεκτονική του GATE	44
Εικόνα 3.2.....	55
Εικόνα 3.3: Παρουσίαση της εφαρμογής της μετατόπισης	57
Εικόνα 3.4 : Παρουσίαση της εφαρμογής της περιστροφής	57
Εικόνα 3.5 : Αλληλεπίδραση σωματιδίων με την ύλη.....	63
Εικόνα 3.6: χάρτης εκπομπής (emission map) από ένα ψηφιακό Hoffman phantom.....	69
Εικόνα 3.7: Ο digitizer ως μια αλυσίδα από μονάδες που ξεκινά με το hit και καταλήγει στο single που αντιπροσωπεύει τα φυσικά μεγέθη που παρατηρεί και καταγράφει ο ανιχνευτής.....	72
Εικόνα 3.8 : Λειτουργία των μονάδων adder και readout	74
Εικόνα 3.9: Για 7 εισερχόμενα σωματίδια και ένα καθορισμένο dead-time $\mathcal{T}$, το nonparalysable μοντέλο του ηλεκτρονικού συστήματος ανάγνωσης δεδομένων (electronic readout) θα καταγράψει 3 σωματίδια ενώ το paralysable μοντέλο θα καταγράψει μόνο 1 σωματίδιο.....	78
Εικόνα 3.10: Ο Object Browser του ROOT όταν ανοίγουμε το αρχείο εξόδου του GATE που περιέχει : 4 ιστογράμματα και 4 δένδρα (GATE, COINCIDENCES, HITS and SINGLES) στα οποία, όπως φαίνεται, είναι αρκετές μεταβλητές αποθηκευμένες.....	79
Εικόνα 3.11 Γράφημα τύπου Michelogram για απεικονιστικό σύστημα 16 κρυσταλλικών δακτυλίων.....	83
Εικόνα 4.1 : Γενική αρχιτεκτονική προσομοίωσης στο GATE.....	91
Εικόνα 4.2: Επίπεδο base του συστήματος ecatt.....	94
Εικόνα 4.3 : Επίπεδο block του συστήματος ecatt.....	94
Εικόνα 4.4 : Επίπεδο crystal του συστήματος ecatt.....	95
Εικόνα 4.5: Το αντικείμενο world.....	98
Εικόνα 4.6 Σύστημα ecatt για την HR+.....	98
Εικόνα 4.7 Σύστημα ecatt για την HR+ (wireframe).....	98
Εικόνα 4.8 : Διαδοχική εφαρμογή γραμμικού (αριστερά) και δακτυλιοειδούς (δεξιά) επαναλήπτη για το endshielding.....	99

Εικόνα 4.9 Αρχικό αντικείμενο blockσε τομή στο yz επίπεδο.....	100
Εικόνα 4.10 Αρχικό αντικείμενο crystal στο εσωτερικό του αρχικού block σε τομή στο yz επίπεδο (αριστερά) και στο xy επίπεδο (δεξιά).....	100
Εικόνα 4.11 Αρχικός Φωτοπολλαπλασιαστής σε τομή στο επίπεδο xy.....	101
Εικόνα 4.12 : Αρχικό block με την διάταξη των 8×8 κρυστάλλων και των 2×2 φωτοπολλαπλασιαστών σε τομή στο επίπεδο xy (αριστερά) και στο επίπεδο yz (δεξιά).....	102
Εικόνα 4.13 Η τετράδα των blocks μετά την εφαρμογή του linear repeater (αριστερά) και η τετράδα των δακτυλίων μετά την εφαρμογή και του ring repeater (δεξιά).....	103
Εικόνα 4.14: Η γεωμετρία του συστήματος ECAT EXACT HR+.....	104
Εικόνα 4.15: Σημειακή πηγή (αριστερά) και γραμμική πηγή (δεξιά) φθορίου-18 στο κέντρο του FOV της ανιχνευτικής διάταξης του συστήματος HR+.....	113
Εικόνα 4.16 : Οπτικοποίηση του προσομοιωμένου συστήματος HR+ κατά την διαδικασία λήψης δεδομένων στην περίπτωση σημειακής πηγής (αριστερά) και γραμμικής πηγής (δεξιά).....	117
Εικόνα 4.17 : Ενεργειακά φάσματα στην περίπτωση του πρώτου πειράματος δηλαδή σημειακής πηγής στο εσωτερικό ενός phantom από αέρα.....	122
Εικόνα 4.18: Ενεργειακά φάσματα που αντιστοιχούν στο δεύτερο πείραμα δηλαδή στην περίπτωση σημειακής πηγής στο εσωτερικό ενός phantom με νερό.....	123
Εικόνα 4.19: Ενεργειακά φάσματα στην περίπτωση του τρίτου πειράματος δηλαδή γραμμικής πηγής στο εσωτερικό ενός phantom από αέρα.....	124
Εικόνα 4.20: Ενεργειακά φάσματα που αντιστοιχούν στο δεύτερο πείραμα δηλαδή στην περίπτωση σημειακής πηγής στο εσωτερικό ενός phantom με νερό.....	124
Εικόνα 4.21 : Ενεργειακά φάσματα συνολικά ανιχνευόμενων Coincidences για την περίπτωση σημειακής και γραμμικής πηγής στον αέρα (αριστερά) και στο νερό (δεξιά).....	125
Εικόνα 4.22 : Ενεργειακά φάσματα συνολικά ανιχνευόμενων Coincidences για την περίπτωση phantom που περιέχει αέρα ή νερό με σημειακή (αριστερά) και γραμμική πηγή (δεξιά).....	126
Εικόνα 4.23: Ενεργειακά φάσματα συνολικά ανιχνευόμενων Coincidences και για τα τέσσερα πειράματα.....	127
Εικόνα 4.24 Τρισδιάστατος χάρτης GlobalX1Y1Z1+SourcePosXYZ για Coincidences στην περίπτωση σημειακής πηγής στον αέρα (1 ^ο πείραμα).....	128
Εικόνα 4.25 : Τρισδιάστατος χάρτης GlobalX1Y1Z1+SourcePosXYZ για Coincidences στην περίπτωση σημειακής πηγής στο νερό (2 ^ο πείραμα).....	128
Εικόνα 4.26: Τρισδιάστατος χάρτης GlobalX1Y1Z1+SourcePosXYZ για Coincidences στην περίπτωση γραμμικής πηγής στον αέρα (3 ^ο πείραμα).....	129
Εικόνα 4.27 : Τρισδιάστατος χάρτης GlobalX1Y1Z1+SourcePosXYZ για Coincidences στην περίπτωση γραμμικής πηγής στο νερό (4 ^ο πείραμα).....	129
Εικόνα 4.28 : Κατανομή των ζευγών ποζιτρονίων που προέρχονται από την ίδια εξαύλωση ως προς την διαφορά της γωνίας που σχηματίζουν μεταξύ τους όταν αλληλεπιδρούν με τη ύλη από την γωνία των 180 μοιρών που ήταν η αρχική γωνία εκπομπής μεταξύ τους.....	131
Εικόνα 4.29:Κατανομή των ποζιτρονίων ως προς την κινητική τους ενέργεια (MeV).....	132
Εικόνα 4.30 : Τρεις όψεις της ανακατασκευασμένης εικόνας σημειακής πηγής στον αέρα (πείραμα 1 ^ο) με χρήση του επαναληπτικού αλγορίθμου OSEM στο STIR.....	134
Εικόνα 4.31: Τρεις όψεις της ανακατασκευασμένης εικόνας γραμμικής πηγής στον αέρα (πείραμα 3 ^ο) με χρήση του επαναληπτικού αλγορίθμου OSEM στο STIR.....	135
Εικόνα 4.32 : Τρισδιάστατος χάρτης SourcePosXYZ πέντε ιδίων σφαιρικών πηγών ίδιας ενεργότητας κατανεμημένες στο χώρο σε διάταξη σταυρού με χρήση του Root.....	136
Εικόνα 4.33 : Τρεις όψεις της ανακατασκευασμένης εικόνας 5 σφαιρικών πηγών ίδιας ενεργότητας ύστερα από χρήση του επαναληπτικού αλγορίθμου OSEM στο STIR.....	137
Εικόνα 4.34 Τρισδιάστατος χάρτης SourcePosXYZ έξι πηγών διαφορετικής ενεργότητας κατανεμημένες στο χώρο σε διάταξη μικρού ανθρώπινου σώματος με χρήση του Root.....	137
Εικόνα 4.35 : Τρεις όψεις της ανακατασκευασμένης εικόνας μιας κατανομής πηγής ανθρωποειδούς μορφής ομοιόμορφης με ομοιόμορφη κατανομή ενεργότητας ύστερα από χρήση του επαναληπτικού αλγορίθμου OSEM στο STIR.....	138
Εικόνα 5.1: Σύγκριση μεταξύ των δύο μεθοδολογιών εύρεσης coincidences για μια δεδομένη ακολουθία από singles.....	147

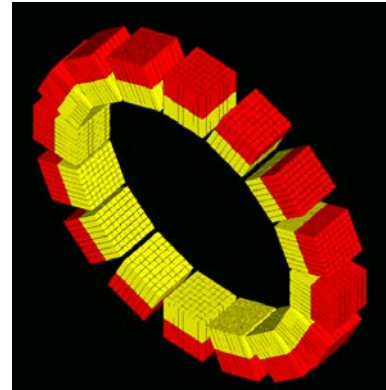
Εικόνα 5.2 :Σύγκριση της συμπεριφοράς όλων των διαθέσιμων πολιτικών πολλαπλού χειρισμού για διάφορες περιπτώσεις πολλαπλών συμπτώσεων.....	150
Εικόνα 5.3 : Σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας του τρόπου ανάγνωσης δεδομένων εξόδου (readout) με βάση όσα αναφέρθηκαν στις παραγράφους των πολλαπλών αλυσίδων επεξεργαστών και της ταξινόμησης πολλαπλών coincidence.....	151

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Εντολές του υποδένδρου γεωμετρίας για διαφορετικά σχήματα	50
Πίνακας 3.2 : Κατάλογος εντολών του υποδένδρου οπτικοποίησης	52
Πίνακας 3.3 : Τα διαθέσιμα συστήματα στο GATE και τα χαρακτηριστικά τους.....	61
Πίνακας 4.1: Στην δεύτερη και τρίτη στήλη περιέχονται τα πειράματα όπου η πηγή βρίσκεται μέσα σε phantom που αποτελείται από αέρα και νερό αντίστοιχα.....	119
Πίνακας 4.2: Ύψος και ακτίνα κατά το πρότυπο NEMA των κυλινδρικών αντικειμένων του phantom καθώς και της σημειακής και της γραμμικής πηγής που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.....	119
Πίνακας 4.3 : Σταθερές πειραματικές μεταβλητές και για τα τέσσερα πειράματα που θα προσομοιωθούν.....	120
Πίνακας 5.1 : Πίνακας των διαθέσιμων πολιτικών χειρισμού πολλαπλών συμπτώσεων (multicoincidences) μαζί με την περιγραφή τα λειτουργικότητας κάθε πολιτικής.....	149

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΓΕΝΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ



1.1 Μοντελοποίηση συστημάτων

Τα τομογραφικά συστήματα που θα μοντελοποιήσουμε στα πλαίσια αυτής της εργασίας ανήκουν στην κατηγορία των τομογράφων εκπομπής ποζιτρονίου και διαφέρουν σε πολλαπλά επίπεδα από τα υπόλοιπα τομογραφικά συστήματα που χρησιμοποιούνται σήμερα σε κλινικές εφαρμογές. Η τεχνολογία πάνω στην οποία βασίζεται η λειτουργία τους αποτελεί αιχμή για τις επιστήμες της Πυρηνικής Ιατρικής, της Τεχνολογίας Υλικών και της Επεξεργασίας Σημάτων.

Στο σημείο αυτό θα ήταν σκόπιμο να αναλύσουμε συνοπτικά και ιεραρχικά όλους τους επιστημονικούς όρους που συνθέτουν τον τίτλο αυτής της εργασίας.

Αρχικά θα αναφερθούμε στην έννοια της μοντελοποίησης που αποτελεί και τη βασικότερο όρο ενώ στην συνέχεια θα αναλύσουμε την έννοια του συστήματος που αποτελεί και το αντικείμενο της μοντελοποίησης.

Ορίζεται ως μοντέλο ενός πραγματικού συστήματος εκείνο το μη πραγματικό σύστημα η λειτουργία του οποίου προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό το πραγματικό σύστημα. Για τον ορισμό και τον ποσοτικό προσδιορισμό του βαθμού προσέγγισης της λειτουργικής συμπεριφοράς ενός πραγματικού συστήματος από τα αντίστοιχα μοντέλα του είναι απαραίτητες οι μετρήσεις διαφόρων βασικών παραμέτρων λειτουργίας όπως η συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος. Έτσι βασική προδιαγραφή κάθε αποδεκτού μοντέλου θα πρέπει να αποτελεί η όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της συνάρτησης μεταφοράς του πραγματικού συστήματος. Για την ποσοτικοποίηση του συγκεκριμένου βαθμού προσέγγισης απαιτείται λοιπόν η μέτρηση και στη συνέχεια η αποδοτική σύγκριση των συναρτήσεων μεταφοράς του πραγματικού συστήματος και των αντιστοίχων μοντέλων του.

Όμως η συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Οι φυσικές ποσότητες που την καθορίζουν είναι η διέγερση (είσοδος) και η απόκρισή (έξοδος) του συστήματος. Στόχος ενός μηχανικού που καλείται να μοντελοποιήσει ένα οποιοδήποτε σύστημα αποτελεί επομένως η κατασκευή ενός μοντέλου του οποίου η απόκριση σε δεδομένη διέγερση προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο την απόκριση του αντίστοιχου πραγματικού συστήματος για την ίδια διέγερση. Συνεπώς το πρόβλημα της μοντελοποίησης ενός συστήματος ανάγεται στο γνωστό πρόβλημα της σχεδίασης ενός συστήματος όπου

έχουμε ως δεδομένα την είσοδο και την έξοδο ενός συστήματος και καλούμαστε να σχεδιάσουμε εκείνο το σύστημα που για δεδομένη διέγερση θα μας δίνει την βέλτιστη προσέγγιση της αντίστοιχης απόκρισης. Όταν η σχεδίαση πραγματοποιείται σε εικονικό περιβάλλον με χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών και εξειδικευμένων πακέτων λογισμικού τότε χρησιμοποιούμε τον όρο προσομοίωση (simulation). Επομένως η προσομοίωση αποτελεί μια ειδική περίπτωση μοντελοποίησης ενός συστήματος.

1.2 Προσομοίωση με χρήση μεθόδων Monte Carlo

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η προσομοίωση αποτελεί ουσιαστικά μια μέθοδο μοντελοποίησης στην οποία σχεδιάζουμε εικονικά το μοντέλο μας με χρήση ειδικών πακέτων λογισμικού στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η ιδιότητα αυτή είναι πολύ σημαντική διότι έτσι επιτυγχάνονται

- ✓ ο σημαντικός περιορισμός του κόστους σχεδίασης,
- ✓ η ασφαλής σχεδίαση ευαίσθητων και επικίνδυνων συστημάτων,
- ✓ η βελτιστοποίηση της σχεδίασης αξιοποιώντας ειδικά υποπρογράμματα και τις εναλλακτικές επιλογές που προσφέρονται σήμερα από την μεγάλη ποικιλία πακέτων λογισμικού προσομοίωσης, καθώς και
- ✓ η επιτάχυνση συγκλίσεως των πειραματικών δεδομένων με τα δεδομένα της προσομοίωσης που συμβάλλει ουσιαστικά στην επιτάχυνση της συνολικής διαδικασίας της μοντελοποίησης ενός συστήματος.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα σε συνδυασμό με την αλματώδη ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων υψηλών επιδόσεων τα τελευταία χρόνια συνέβαλλαν στην καθιέρωση των τεχνικών προσομοίωσης ως ένα βασικό και αναγκαίο βήμα στην διαδικασία μοντελοποίησης ενός συστήματος. Σε όλο σχεδόν το φάσμα των εφαρμογών της μοντελοποίησης χρησιμοποιούνται πλέον τεχνικές προσομοίωσης ως το αρχικό και ενδιάμεσο στάδιο σχεδίασης ενός μοντέλου. Στην συνέχεια το τελικό μοντέλο προσομοίωσης κατασκευάζεται με φυσικά μέσα και εξετάζεται η τυχόν παιρετέρω βελτιστοποίηση του. Η επαναχρησιμοποίηση τεχνικών προσομοίωσης δεν αποκλείεται ούτε σε αυτό το τελικό στάδιο σε περίπτωση που κριθεί αναγκαία.

Μερικές από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες σε εφαρμογές Πυρηνικής Φυσικής και Ιατρικής είναι οι τεχνικές Monte Carlo. Οι προσομοιώσεις που βασίζονται σε τεχνικές Monte Carlo αποτελούν απαραίτητο εργαλείο για τον σχεδιασμό εξελιγμένων κλινικών τομογραφικών συστημάτων πυρηνικής ιατρικής. Χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σήμερα για τον προσδιορισμό και την επίλυση θεμάτων που αφορούν την πυρηνική ιατρική απεικόνιση και πιο συγκεκριμένα

- για τον έλεγχο, αξιολόγηση και βελτιστοποίηση εμπορικών συστημάτων ποζιτρονικής (positron emission tomography PET) και μόνοφωτονικής τομογραφίας (single photon emission tomography SPECT) με στόχο την βελτίωση της γεωμετρίας της ανιχνευτικής διάταξης, του ηλεκτρονικού τμήματος συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων και των τεχνικών ποσοτικοποίησης της τελικής εικόνας,
- για κινητικές μελέτες εξελιγμένων ραδιοφαρμάκων,
- για μελέτες δοσιμετρίας και
- για την αξιολόγηση νέων μεθόδων ανακατασκευής εικόνας.

Έως σήμερα υπάρχουν δύο κατηγορίες αλγορίθμων Monte Carlo που χρησιμοποιούνται στον τομέα της πυρηνικής απεικόνισης: οι αλγόριθμοι γενικού σκοπού (general purpose codes) όπως είναι οι MCNP, GEANT, ITS, EGS4 και οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί για προσομοίωση πειραμάτων φυσικής υψηλών ενεργειών και για υπολογισμούς δοσιμετρίας καθώς και τους εξειδικευμένους αλγόριθμους (dedicated algorithms) οι οποίοι έχουν υλοποιηθεί ειδικά για εφαρμογές PET και SPECT όπως SIMIND, SimSET, SimSPECT και PETSIM.

Όμως στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε πως ένα σύστημα αποτελείται από διάφορα τμήματα τα οποία έχουν διακριτές λειτουργίες οι οποίες είναι εξίσου απαραίτητες

και καθοριστικές για την ποιότητα απεικόνισης. Είναι απαραίτητο λοιπόν να επιλέξουμε εκείνο τον αλγόριθμο που θα έχει την δυνατότητα να λάβει υπ' όψιν του την αλληλεπίδραση όλων των στοιχείων του συστήματος κατά την προσομοίωση. Οι εξειδικευμένοι αλγόριθμοι ενώ γενικά χαρακτηρίζονται από πιο εύκολο και απλό χειρισμό καθώς έχουν σχεδιαστεί για PET και SPECT δεν μπορούν να προσομοιώσουν την επίδραση στην τελική εικόνα κάποιων συγκεκριμένων δομών του συστήματος, όπως για παράδειγμα τους φωτοπολλαπλασιαστές (photomultiplier tubes PMTs). Επιπλέον δεν διαθέτουν την απαιτούμενη ευελιξία ως προς το είδος των συστημάτων απεικόνισης που μπορούν να προσομοιώσουν. Έτσι αδυνατούν να μοντελοποιήσουν ορισμένα μη συμβατικά τομογραφικά συστήματα. Αντίθετα οι αλγόριθμοι γενικού σκοπού διαθέτουν αυτήν την ευελιξία, επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ακρίβεια μοντελοποίησης, μπορούν να προσομοιώσουν την αλληλεπίδραση σωματιδίων με την ύλη για τα περισσότερα υλικά και γεωμετρικές διατάξεις και διαθέτουν εργαλεία οπτικοποίησης. Όμως είναι πολύπλοκοι και η εκμάθησή τους με αποκλειστικό στόχο τις εφαρμογές πυρηνικής απεικόνισης καθίσταται μη αποδοτική.

Για τον συνδυασμό των πλεονεκτημάτων των παραπάνω αλγορίθμων σχεδιάστηκε, αναπτύχθηκε και τώρα ελέγχεται και αξιολογείται ένα καινούργιο πακέτο λογισμικού προσομοίωσης: το GATE (Εφαρμογή του Geant4 για Τομογραφία Εκπομπής – Geant4 Application for Tomography Emission). Υπεύθυνη για την εξέλιξη, αξιολόγηση και επικύρωσή του είναι μια ομάδα ερευνητικών ιδρυμάτων στον κόσμο που ονομάζεται OpenGATE Collaboration και ιδρύθηκε πριν τέσσερα χρόνια. Το GATE αποτελεί ένα εξελιγμένο πακέτο προσομοίωσης, υλοποιημένο σε κλάσεις της C++ βασισμένο πάνω στον αλγόριθμο γενικού σκοπού του Geant4 και με τέτοια φιλοσοφία σχεδιασμού έτσι ώστε να ικανοποιεί τις συγκεκριμένες προδιαγραφές όλων των εφαρμογών PET και SPECT. Έχει σχεδιαστεί για την προσομοίωση της λειτουργίας όλων των μονάδων ενός συστήματος τομογραφίας εκπομπής. Ενσωματώνει τις απαραίτητες βιβλιοθήκες του Geant4 σε ένα σύνολο από εργαλεία το οποίο είναι με σαφή τρόπο δομημένο, έχει την δυνατότητα προσαρμογής σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές PET/SPECT και ορίζεται εύκολα με την χρήση μακροεντολών χωρίς να προαπαιτείται γνώση της C++. Περιλαμβάνει εξειδικευμένες μονάδες οι οποίες είναι απαραίτητες για την εκτέλεση ρεαλιστικών προσομοιώσεων όπως μονάδες διαχείρισης χρόνου ή διαδικασιών με χρονική εξάρτηση (π.χ. κινήσεις ανιχνευτών και πηγών, ραδιενεργές εκπομπές και δυναμικές λήψεις δεδομένων), σύνθετες κατανομές πηγών ακτινοβολίας καθώς και απλή περιγραφή της γεωμετρίας του συστήματος ανίχνευσης. Η ικανότητα συγχρονισμού όλων των χρονικά εξαρτώμενων τμημάτων της προσομοίωσης επιτρέπει μια σαφή περιγραφή της διαδικασίας λήψης δεδομένων και παράλληλα αποτελεί ένα από τα πιο πρωτοποριακά χαρακτηριστικά του GATE. Ένας από τους στόχους της OpenGATE Collaboration όταν ιδρύθηκε με σκοπό την ανάπτυξη του GATE ήταν η δημιουργία ενός λογισμικού ανοιχτού κώδικα το οποίο θα μπορούσε να διανεμηθεί χωρίς οικονομικές απαιτήσεις σε ολόκληρη την επιστημονική κοινότητα της Πυρηνικής Ιατρικής. Θα αναφερθούμε εκτενώς στο GATE και τις βασικές λειτουργικές ιδιότητες στο τρίτο κεφάλαιο καθώς θα αποτελέσει το εργαλείο μοντελοποίησης τομογραφικών συστημάτων.

1.3 Συστήματα ιατρικής πυρηνικής τομογραφικής απεικόνισης

Ο τρίτος όρος που θα αναλύσουμε ακολούθως είναι ο όρος σύστημα. Αποτελεί μια από τις πιο βασικές έννοιες που θα μας απασχολήσει στην συνέχεια καθώς πρόκειται για το αντικείμενο της μοντελοποίησής μας. Μετά από την διασαφήνιση των όρων μοντελοποίησης και προσομοίωσης καλούμαστε να απαντήσουμε στα επόμενα ερωτήματα:

1. Τι ορίζουμε ως σύστημα
2. Ποια είναι τα χαρακτηριστικά των συστημάτων που θα μοντελοποιήσουμε

Ως σύστημα ορίζουμε ένα σύνολο από αυτόνομες λειτουργικές μονάδες οι οποίες επικοινωνούν και συντονίζονται αρμονικά μεταξύ τους με στόχο την επίτευξη καθορισμένης λειτουργίας που ικανοποιεί συγκεκριμένες προδιαγραφές. Κάθε σύστημα δέχεται ως είσοδο ένα σήμα διέγερσης και παράγει ως έξοδο ένα σήμα απόκρισης ενώ επίσης χαρακτηρίζεται

και από μια συνάρτηση μεταφοράς η οποία συσχετίζει την είσοδο με την έξοδο. Τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης μεταφοράς καθορίζουν και το είδος του συστήματος. Έτσι υπάρχουν γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα όπως επίσης χρονικά αμετάβλητα ή μεταβλητά συστήματα.

Όταν επιδιώκουμε την μοντελοποίηση ενός συστήματος θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και τις ιδιότητες όλων των αυτόνομων υποσυστημάτων που το απαρτίζουν. Ανάλογα με τον βαθμό επίδρασης κάθε υποσυστήματος στην τελική απόκριση του συστήματος θα πρέπει να αποδοθεί και η κατάλληλη βαρύτητα στην ένταξη των παραμέτρων των αντίστοιχων υποσυστημάτων στην προσομοίωση. Βασικά υποσυστήματα που διαμορφώνουν σε μεγάλο βαθμό την τελική έξοδο θα πρέπει να μοντελοποιηθούν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Αντίστοιχα, υποσυστήματα που έχουν αμελητέα επίδραση στην διαμόρφωση της συνολικής απόκρισης μπορούν να παραλειφθούν. Σε κάθε περίπτωση το απόλυτο κριτήριο για την αξιολόγηση της μοντελοποίησης ενός συστήματος αποτελεί η όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση των δεδομένων προσομοίωσης στα πραγματικά πειραματικά δεδομένα.

Τα τομογραφικά συστήματα πυρηνικής ιατρικής βασίζουν την τεχνολογία τους σε αρχές και φαινόμενα της πυρηνικής φυσικής. Αποτελούν μια νέα γενιά σαρωτών (scanner) με διαφορετικές αρχές λειτουργίας από τα υπόλοιπα ιατρικά απεικονιστικά συστήματα που βασίζονται σε τεχνολογίες υπολογιστικής (computed tomography CT) ή μαγνητικής τομογραφίας (magnetic resonance imaging MRI). Η πληροφορία που μας παρέχουν είναι διαφορετική από την αντίστοιχη των υπόλοιπων κατηγοριών τομογραφικών συστημάτων και για αυτόν τον λόγο δεν τα αντικαθιστά. Ωστόσο πρόκειται για πληροφορία σημαντική όσον αφορά την διάγνωση και η οποία προηγουμένως δεν ήταν διαθέσιμη. Επομένως η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων καθώς και η κλινική και ερευνητική εφαρμογή τους σε συνδυασμό με τις άλλες τεχνολογίες τομογραφίας μας έδωσε την δυνατότητα να διαθέτουμε εικόνες υψηλότερης διαγνωστικής αξίας.

Τα συστήματα τομογραφίας εκπομπής αξιοποιούν τα φαινόμενα της εκπομπής σωματιδίων από ραδιοσημασμένα ισότοπα που διοχετεύονται στο εξεταζόμενο οργανισμό και εν συνέχεια της αλληλεπίδρασης αυτών των σωματιδίων με ειδικούς κρυστάλλους. Τόσο το υλικό των κρυστάλλων-ανιχνευτών όσο και η γεωμετρία κάθε ανιχνευτικής διάταξης καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την τελική διαγνωστική εικόνα και για αυτό απαιτείται η χρήση πολλών παραμέτρων για την ακριβή προσομοίωση της λειτουργικής συμπεριφοράς τους. Η ηλεκτρονική συλλογή, έλεγχος και επεξεργασία των σημάτων αποτελούν επίσης λειτουργικές μονάδες του συστήματος τομογραφίας που θα πρέπει εξίσου να μοντελοποιηθούν με μεγάλη ακρίβεια. Τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των συστημάτων πυρηνικής απεικόνισης θα μελετήσουμε στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας.

Το πακέτο λογισμικού προσομοίωσης GATE έχει σχεδιαστεί για την προσομοίωση της λειτουργίας όλων των μονάδων ενός συστήματος τομογραφίας εκπομπής. Αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματά του έναντι εναλλακτικών υλοποιήσεων Monte Carlo, προσομοιώνεται το εμπορικά διαθέσιμο PET σύστημα της Siemens ECAT EXACT HR+ στο τέταρτο κεφάλαιο με την χρήση του GATE. Στα πλαίσια αυτής της εφαρμογής δίνεται η δυνατότητα παρουσίασης όλων των επιλογών και δυνατοτήτων που προσφέρει το GATE μέσα από μια βήμα προς βήμα περιγραφή της υλοποίησης του κώδικα της προσομοίωσης με χρήση μακροεντολών. Στην συνέχεια την περιγραφή αυτή διαδέχεται η παρουσίαση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων τεσσάρων πειραμάτων του μοντελοποιημένου συστήματος HR+. Τέλος η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αποτελέσματα που αναμένονται από ένα πραγματικό σύστημα HR+ υπό τις ίδιες πειραματικές συνθήκες οδηγεί στην επικύρωση του συστήματος της και αναδεικνύει την σημασία των εφαρμογών της μοντελοποίησης, και πιο συγκεκριμένα του πακέτου λογισμικού GATE, στο πεδίο της Πυρηνικής Ιατρικής Απεικόνισης.

1.4 Νέες δυνατότητες προσομοίωσης

Τα συστήματα τομογραφίας εκπομπής συνεχώς εξελίσσονται με στόχο την βελτιστοποίηση της επίδοσης λειτουργίας τους έτσι ώστε οι εικόνες που παράγονται να έχουν υψηλότερη

διαγνωστική αξία, η λήψη δεδομένων και η ανακατασκευή να γίνεται ταχύτερα και το κόστος λειτουργίας να περιοριστεί. Για την βελτιστοποίηση αυτών των συστημάτων οι προσομοιώσεις Monte Carlo είναι απαραίτητες όπως περιγράψαμε παραπάνω και θα αποδειχθεί στα επόμενα κεφάλαια. Οι απαιτήσεις για συνεχώς πιο καλύτερη προσέγγιση της απόκρισης ενός πραγματικού συστήματος απεικόνισης από την απόκριση του αντίστοιχου μοντέλου του όταν και τα δύο δέχονται την ίδια διέγερση αυξάνονται διαρκώς. Η συνεχής αύξηση των απαιτήσεων και των προσδοκιών αναδεικνύει την αυξανόμενη σημασία που δίνει η επιστήμη της Ιατρικής στις τεχνολογικές εφαρμογές της Πυρηνικής Ιατρικής Απεικόνισης και επομένως αποτελεί τον πιο αξιόπιστο δείκτη χρησιμότητας των συγκεκριμένων εφαρμογών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός τεράστιου ερευνητικού ενδιαφέροντος σχετικά με τον συγκεκριμένο τομέα ιατρικής απεικόνισης όπως επίσης και την εκπόνηση πολλών σχετικών επιστημονικών εργασιών τα τελευταία χρόνια. Από την τάση αυτή φυσικά δεν μπορούν να εξαιρεθούν τα πακέτα λογισμικού προσομοιώσεων Monte Carlo όπως το GATE. Νέες μονάδες μοντελοποίησης και επεκτάσεις των ορισμών των προηγούμενων εκδόσεων προστίθενται συνεχώς σε κάθε νέα έκδοση με στόχο την προσομοίωση της επίδρασης κάθε πιθανού παράγοντα που υπεισέρχεται σε ένα πείραμα που σχετίζεται με ένα συγκεκριμένο κάθε φορά σύστημα απεικόνισης. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ακόμα καλύτερη συμφωνία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Ο ορισμός ενός μέρους των καινούργιων σε κάθε έκδοση παραμέτρων καθίσταται υποχρεωτικός στην περίπτωση που αυτές οι παράμετροι αποδειχθούν ότι επιδρούν σημαντικά στην ποιότητα του τελικού σήματος εξόδου και δεν υπάρχει τρόπος υπολογισμού τους απευθείας από το σύστημα. Για τις περισσότερες καινούργιες παραμέτρους όμως δεν ισχύει τουλάχιστον μια από τις δύο παραπάνω προϋποθέσεις και επομένως ο ορισμός τους καθίσταται προαιρετικός. Ο καθορισμός κάθε προαιρετικής παραμέτρου εναπόκειται στον βαθμό ακρίβειας που τίθεται κάθε φορά ως ελάχιστη προδιαγραφή. Κάθε προδιαγραφή, με την σειρά της, αντιστοιχεί και σε ένα σύνολο εφαρμογών. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής οι προδιαγραφές μπορεί να είναι είτε υψηλές είτε χαμηλές. Εάν δεν καθορίσει ο ίδιος ο χρήστης κάποια συγκεκριμένη τιμή, τότε αυτόματα ανατίθεται μια προκαθορισμένη τιμή ή μια τιμή που προέκυψε από έναν κρυφό (μη ορατό στον χρήστη) υπολογισμό του GATE. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται αναλυτικά οι ορισμοί όλων των παραμέτρων όλων των μονάδων προσομοίωσης που χρησιμοποιούν οι αρχικές εκδόσεις του GATE. Για την πληρότητα όμως της παρουσίασης καθώς και για την ανάδειξη των μεθοδολογιών με τις οποίες μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε περισσότερο ένα σύστημα τομογραφικής απεικόνισης, παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5 οι νέες δυνατότητες που προσφέρει το GATE αποσκοπώντας τόσο στην υποστήριξη μιας μεγαλύτερης ποικιλίας τεχνολογιών τομογραφίας εκπομπής όσο και στην ακριβέστερη προσομοίωση ενός δεδομένου συστήματος. Η παρουσίαση των νέων χαρακτηριστικών αφορά συνήθως ένα συγκεκριμένο τμήμα της προσομοίωσης που σχετίζεται με την ηλεκτρονική απόκριση των ανιχνευτών ενός συστήματος το οποίο έχει και τον μεγαλύτερο βαθμό πολυπλοκότητας και ονομάζεται ψηφιοποιητής (*digitizer*). Ο ψηφιοποιητής υλοποιείται ως μια αλυσίδα διαδοχικών μονάδων επεξεργασίας σήματος στην οποία ο χρήστης μπορεί να δημιουργεί και να αφαιρεί μονάδες όπως επίσης και να τις συνδέει με διάφορους τρόπους. Λόγω της πολυπλοκότητας του συγκεκριμένου τμήματος υπάρχει μεγάλη ευελιξία χειρισμού των δεδομένων. Η αναζήτηση της πιο αποδοτικής και οικονομικής σε χρόνο και αξία διαχείρισης δεδομένων αποτελεί αντικείμενο της σύγχρονης έρευνας στον τομέα της ανάπτυξης ιατρικών απεικονιστικών συστημάτων. Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι η δυνατότητα μιας όσο το δυνατόν πιο ακριβούς προσομοίωσης της πραγματικής ηλεκτρονικής απόκρισης των ανιχνευτών θα συνέβαλλε καθοριστικά και στην γρήγορη και αποτελεσματική βελτιστοποίηση της. Η εξέλιξη της τεχνολογίας προσομοιώσεων είναι αλληλένδετη με την εξέλιξη στον τομέα της ανάπτυξης ιατρικών συστημάτων τομογραφίας εκπομπής.

Κεφάλαιο 2

ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ



2.1 Επισκόπηση του PET

Η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίου (positron emission technology – PET) έχει ενσωματώσει στις γνώσεις της το βιοχημικό υπόβαθρο των φυσιολογικών και μη φυσιολογικών διαδικασιών του οργανισμού και με αυτόν τον τρόπο κατέστησε δυνατή την βιοχημική εξέταση των ασθενών σαν κομμάτι της κλινικής θεραπείας που τους προσφέρεται. Αυτές οι προσφερόμενες από το PET δυνατότητες είναι σημαντικές επειδή: Η βάση της λειτουργίας όλων των ιστών είναι χημική.

Οι διάφορες ασθένειες προκαλούνται από λάθη τα οποία εισάγονται στα χημικά συστήματα του οργανισμού μας από ιούς, βακτήρια, γενετικές ανωμαλίες, φάρμακα, περιβαλλοντικούς παράγοντες, ηλικία και από την συμπεριφορά.

Η πιο επιλεκτική, εξειδικευμένη και κατάλληλη θεραπεία είναι εκείνη που επιλέγεται με κριτήριο την ικανότητα της να διαγνώσει τις βασικές χημικές ανωμαλίες.

Η ανίχνευση χημικών ανωμαλιών παρέχει την εγκαίρως αναγνώριση της ασθένειας, ακόμα και στα προσυμπτωματικά στάδιά της πριν η ασθένεια εξαντλήσει τα χημικά αποθέματα και τους μηχανισμούς άμυνας του

Η συμβολή στην ανάκτηση της σωστής χημικής λειτουργίας παρέχει ένα αντικειμενικό μέσο για τον καθορισμό της αποτελεσματικότητας των θεραπευτικών επεμβάσεων στον ασθενή.

Ο βέλτιστος τρόπος για να κρίνεις εάν ένας ιστός είναι φυσιολογικός είναι μέσα από τον έλεγχο της βιοχημικής λειτουργίας του.

Τέλος πρέπει να τονίσουμε την σπουδαιότητα της εξέτασης αυτών των βιοχημικών διαδικασιών μέσα από μια κατάλληλη τεχνική απεικόνισης, όπως είναι το PET. Επειδή, συνήθως, το ακριβές σημείο και η έκταση της ασθένειας είναι άγνωστα, ο πρώτος στόχος είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος αναζήτησης μέσα στον οργανισμό για τον καθορισμό

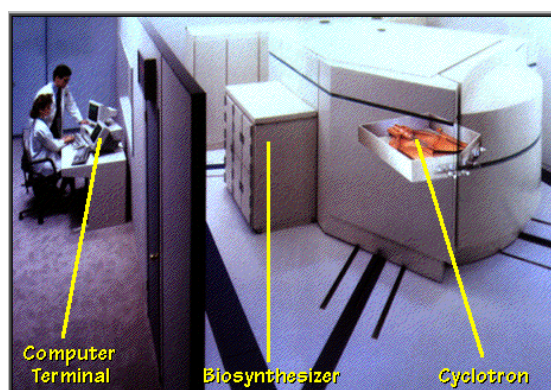
του ακριβούς σημείου. Η απεικόνιση είναι μια εξαιρετικά αποτελεσματική διαδικασία για την επίτευξη αυτού του στόχου, επειδή τα δεδομένα παρουσιάζονται εποπτικά σε μορφή εικόνων στο πιο ανεπτυγμένο ανθρώπινο σύστημα αίσθησης για αναζήτηση, αναγνώριση κι ερμηνεία: το οπτικό σύστημα.

Το PET παρέχει τα μέσα για απεικόνιση των ρυθμών με τους οποίους εξελίσσονται οι βιολογικές διαδικασίες *in vivo*. Η απεικόνιση (imaging) επιτυγχάνεται μέσα από την ολοκλήρωση δύο τεχνολογιών, της μεθόδου της εκτίμησης της κινητικότητας του ανιχνευτή (tracer kinetic assay method) και της υπολογιστικής τομογραφίας (computed tomography - CT). Η μέθοδος της εκτίμησης της κινητικότητας του ανιχνευτή επιστρατεύει ένα ραδιοσημασμένο (radiolabeled) βιολογικά ενεργό συστατικό, το οποίο ορίζουμε ως ανιχνευτή (tracer) και ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την κινητικότητα του ανιχνευτή καθώς συμμετέχει στις βιολογικές διαδικασίες. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό του ρυθμού κάθε τέτοιας βιολογικής διαδικασίας. Η συγκέντρωση του ανιχνευτή στον ιστό, που χρειάζεται το μοντέλο κινητικότητας, παρέχεται από τον PET scanner. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια τρισδιάστατη εικόνα της ανατομικής κατανομής της υπό μελέτη βιολογικής διαδικασίας.

Οι ραδιοσημασμένοι ανιχνευτές και η μέθοδος της κινητικότητας των ανιχνευτών επιστρατεύθηκαν από όλες τις βιολογικές επιστήμες με σκοπό τον υπολογισμό τέτοιων διαδικασιών όπως ροή αίματος, μεταφορά μεμβράνης, μεταβολισμό, σύνθεση, υπολογισμό ημερομηνίας γέννησης κυττάρων, εκτιμήσεις ιχνηθετών (markers) με την χρησιμοποίηση επανασυνδυασμένου DNA και αλληλεπιδράσεις μεταξύ φαρμάκων και των χημικών συστημάτων του οργανισμού. Η τεχνική του ανιχνευτή εξακολουθεί να είναι μια από τις πιο ευαίσθητες και ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθοδολογίες για την εκτίμηση των βιολογικών συστημάτων. Το PET επέτρεψε την μεταφορά της μεθοδολογίας εκτίμησης της κινητικότητας του ανιχνευτή σε ζωντανούς οργανισμούς, όπως ο άνθρωπος. Το PET χτίζει μια γέφυρα επικοινωνίας και έρευνας μεταξύ των βασικών και κλινικών επιστημών βασιζόμενο πάνω στις ομοιότητες των χρησιμοποιούμενων μεθόδων και των προβλημάτων που καλείται να μελετήσει.

Η μεταφορά των μεθόδων κινητικότητας ανιχνευτών από τις βασικές βιολογικές επιστήμες στους ανθρώπους με το PET κατέστη δυνατή από την μοναδική φύση των ραδιοϊσοτόπων που χρησιμοποιήθηκαν από το PET για την σήμανση των ανιχνευτών: ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O και ^{18}F . Αυτές είναι οι μοναδικές ραδιενεργές μορφές χημικών στοιχείων (το ραδιοϊσότοπο ^{18}F έχει αντικαταστήσει το υδρογόνο) που εκπέμπουν ραδιενέργεια η οποία θα διαπεράσει το σώμα για εξωτερική ανίχνευση. Φυσικά συστατικά και φάρμακα μπορούν να σημανθούν με τα συγκεκριμένα ραδιοϊσότοπα χωρίς να αλλάξουν οι χημικές και βιολογικές ιδιότητές τους.¹

2.2 Παραγωγή Ραδιοϊσοτόπων

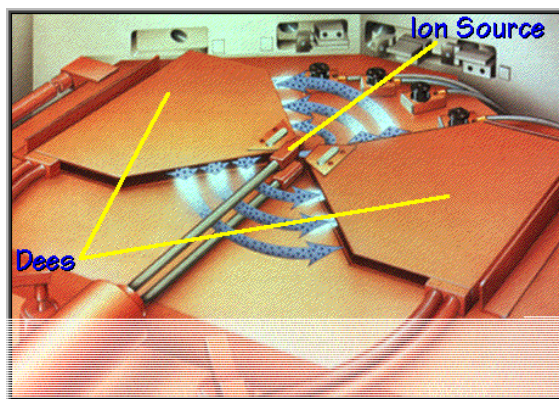


Εικόνα 2.1: Σύστημα διανομής ραδιοϊσοτόπων (RDS)

¹ [Απόσπασμα από: Phelps, M.E., Positron Emission Tomography. In: Mazziotta, J. and Gilman, S., Eds., *Clinical Brain Imaging: Principles and Applications*, 1992, F.A. Davis Company, σελ 71-107]

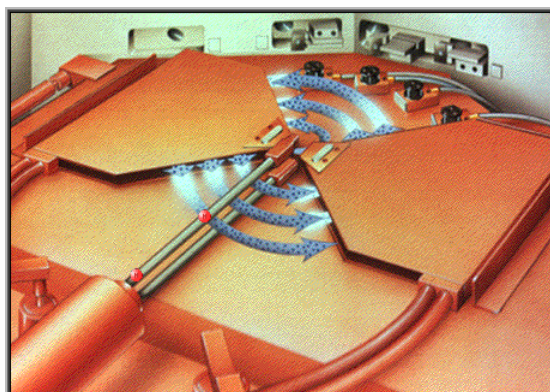
Εδώ παρουσιάζονται τα τρία κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται το σύστημα διανομής ραδιοϊσοτόπων (radioisotope delivery system - RDS). Το κύκλοτρο (cyclotron device) είναι ένας επιταχυντής σωματιδίων που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των ραδιοϊσοτόπων. Αυτά τα ραδιοϊσότοπα, στην συνέχεια, προσαρτώνται σε βιολογικά συγγενή μόρια με την βοήθεια μιας μονάδας βιοσύνθεσης. Η όλη διαδικασία ελέγχεται από έναν προσωπικό υπολογιστή.

2.2.1 Λειτουργία κύκλοτρο (Cyclotron Operation)



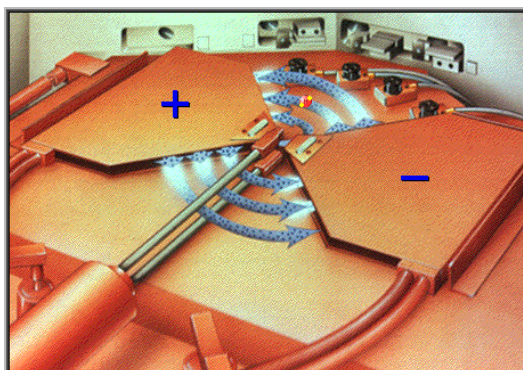
Εικόνα 2.2: Κύκλοτρο 1

Το κύκλοτρο αποτελείται από ένα ζευγάρι ημικυκλικών μεταλλικών ηλεκτροδίων (με κενό αέρα στο εσωτερικό τους) τα οποία τοποθετούνται ανάμεσα στους πόλους ενός μεγάλου ηλεκτρομαγνήτη (δεν απεικονίζεται στις εικόνες). Τα ηλεκτρόδια διαχωρίζονται μεταξύ τους από ένα στενό κενό. Κοντά στο κέντρο των ηλεκτροδίων βρίσκεται μια πηγή ιόντων (στην ουσία ένα ηλεκτρικό τόξο μέσα σε κατάλληλο αέριο). Το οποίο χρησιμοποιείται για την παραγωγή φορτισμένων σωματιδίων.



Εικόνα 2.3 : Κύκλοτρο 2

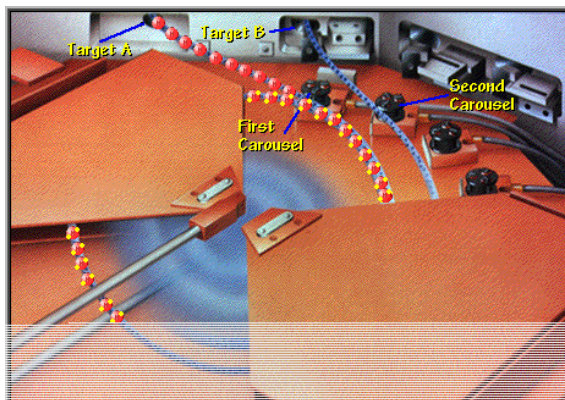
Κατά την λειτουργία, σωματίδια, (όπως ιόντα υδρογόνου που απεικονίζονται στο σχήμα) παράγονται από την πηγή ιόντων. Το θερμαινόμενο ηλεκτρικό νήμα που βρίσκεται μέσα στην πηγή ιόντων δημιουργεί αρνητικό φορτίο πάνω στα ιόντα υδρογόνου αφού τους προσάπτει δύο ηλεκτρόνια (τα ηλεκτρόνια απεικονίζονται με κίτρινο στις εικόνες που ακολουθούν). Όπως τα αρνητικά ιόντα εισέρχονται στο κενό δοχείο αποκτούν ενέργεια εξαιτίας του ηψισυχνου εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου που επάγεται στα ηλεκτρόδια. Καθώς τα αρνητικά ιόντα ρέουν από την πηγή ιόντων, εκτίθενται σε αυτό το ηλεκτρικό πεδίο όπως επίσης και στο ισχυρό μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τους δύο μαγνητικούς πόλους πάνω και κάτω από την διάταξη των ηλεκτροδίων. Επειδή αυτά είναι φορτισμένα σωματίδια μέσα σε μαγνητικό πεδίο, τα αρνητικά ιόντα εκτελούν κυκλική τροχιά.



Εικόνα 2.4 Κύκλοτρο 3

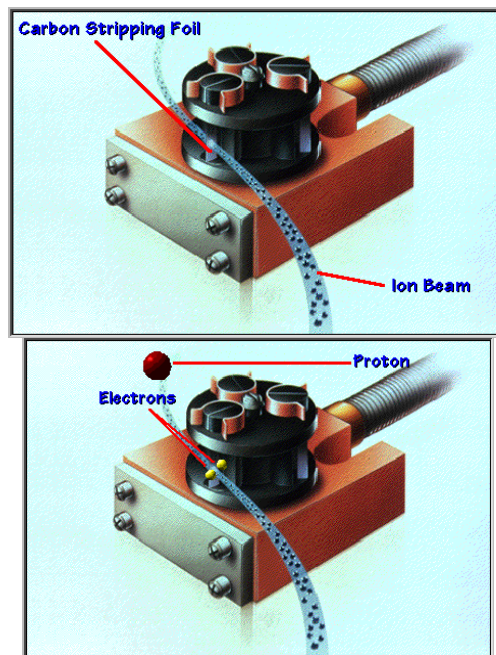
Όταν τα αρνητικά ιόντα φθάσουν στην άκρη των ηλεκτροδίων και εισέλθουν στο κενό, τότε ο RF ταλαντωτής αλλάζει την πολικότητα των ηλεκτροδίων. Τα αρνητικά ιόντα απωθούνται καθώς εξέρχονται από το προηγούμενως θετικό αλλά τώρα αρνητικό ηλεκτρόδιο. Κάθε φορά που τα σωματίδια διασχίζουν το κενό αποκτούν ενέργεια και έτσι η ακτίνα της τροχιάς συνεχώς αυξάνει με αποτέλεσμα τα σωματίδια να εκτελούν μια σπειροειδή τροχιά προς τα έξω. Τα σωματίδια απωθούνται από το πρώτο ηλεκτρόδιο και ολισθαίνουν κατά μήκος μιας κυκλικής διαδρομής μέχρι να γίνει έλξη και να «τραβηχτούν» από το δεύτερο ηλεκτρόδιο το οποίο έχει γίνει θετικό. Το αποτέλεσμα είναι ένα ρεύμα από αρνητικά ιόντα τα οποία επιταχύνονται κυκλικά με σπειροειδή τροχιά προς τα έξω.

2.2.2 To Carousel



Εικόνα 2.5 : Κύκλοτρο και Carousel

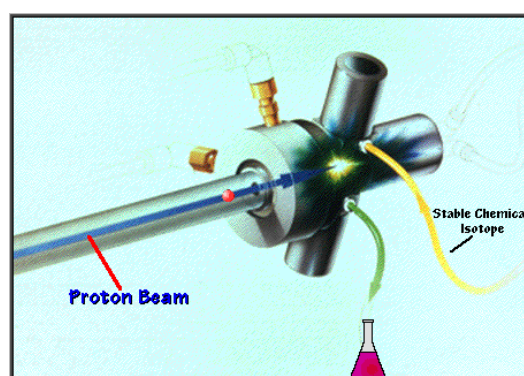
Το ρεύμα των αρνητικών ιόντων κατευθύνεται προς το πρώτο carousel το οποίο είναι τοποθετημένο ανάμεσα στους επιταχυντές και τον θάλαμο στόχο A. Τα carousels περιέχουν λεπτά στρώματα άνθρακα τα οποία αποσπών από κάθε αρνητικό ιόν υδρογόνου (H^-) τα δύο ηλεκτρόνια του. Όταν, λοιπόν τα αρνητικά ιόντα χάσουν και τα δύο τους ηλεκτρόνια, γίνονται κατιόντα υδρογόνου (H^+) ή αλλιώς πρωτόνια (στο σχήμα φαίνονται με κίτρινο χρώμα τα ηλεκτρόνια που αποσπώνται). Ένας ελεγχόμενος από υπολογιστή διαχωριστής, χωρίζει την ακτίνα των πρωτονίων και την κατευθύνει σε δύο χωριστούς στόχους. Το στρώμα διαχωρισμού (carbon stripping foil) τοποθετείται μερικώς μέσα στην ακτίνα έτσι ώστε να εξάγεται ένα μέρος αυτής. Τα υπόλοιπα σωματίδια συνεχίζουν να εκτελούν κυκλική τροχιά ολοκληρώνοντας μια επιπλέον τροχιά.



Εικόνα 2.6 Carousel

Στα συστήματα αρνητικών ιόντων, η ακτίνα πρωτονίων (proton beam) εξάγεται με την διάσχιση ακτίνας ιόντων (H^-) μέσα από λεπτό ανθρακικό στρώμα (thin carbon foil), που βρίσκεται σε έναν από τα τέσσερα carousel. Τα στρώματα εξαγωγής (extraction foils) αποσπούν από κάθε άτομο (H^-) τα δύο του ηλεκτρόνια, και έτσι τα άτομα μετατρέπονται σε (H^+) δηλαδή κατιοντα υδρογόνου ή πρωτόνια και είναι πλέον θετικά φορτισμένα. Τα πρωτόνια προχωρούν μέσα από το στρώμα. Όμως επειδή τώρα έχουν αντίθετο φορτίο, είναι ακόμα υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου και εκτελούν κυκλική κίνηση εφαπτομενικά προς την προηγούμενη τους τροχιά, και μακριά από το κέντρο του κύκλου. Το ρεύμα πρωτονίων κατευθύνεται προς τον θάλαμο στόχο (target chamber). Τα στρώματα εξαγωγής κυμαίνονται σε πάχος από 5 έως 25Bμm και έχουν περίπου 100 ώρες όριο ζωής.

2.2.3 Θάλαμος-στόχος (Target Chamber)



Εικόνα 2.7 Θάλαμος στόχος

Οι θάλαμοι στόχοι ενσωματώνονται στο συνολικό σύστημα RDS για να βελτιστοποιήσουν την απόδοση τόσο των στόχων όσο και των άλλων RDS στοιχείων (κύκλωτρο, γραμμές μεταφοράς ακτίνων, θωράκιση και έλεγχος από H/Y). Οι θάλαμοι στόχοι χαρακτηρίζονται από μικρό μέγεθος για οικονομική θωράκιση, ευκολία απόσυρσης και εγκατάστασης και από μια απλή αξιόπιστη σχεδίαση.

Κατά την προετοιμασία για βομβαρδισμό, ένα σταθερό χημικό ισότοπο (stable chemical isotope) φορτώνεται στον θάλαμο στόχο.

Η δέσμη πρωτονίων (proton beam) από το κύκλοτρο εισέρχεται στον θάλαμο στόχο και μετά από μια πυρηνική αντίδραση αλλάζει το σταθερό υλικό στόχο σε ένα ραδιενεργό ισότοπο. Αυτά τα ραδιοϊσότοπα είναι ασταθή και αποσυντίθενται με μια διαδικασία που περιλαμβάνει εκπομπή ποζιτρονίων. Σε αυτήν την ιδιότητα στηρίζεται η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίου (PET).

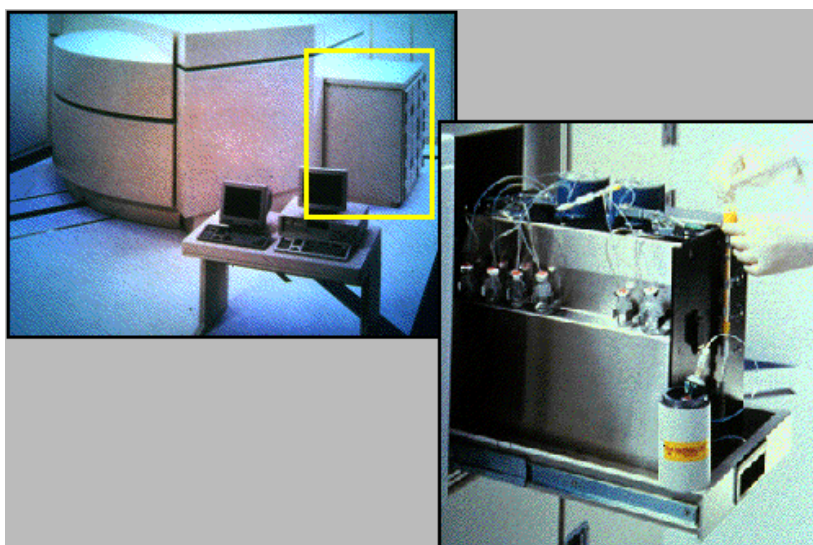
2.2.4 Μονάδα Ελέγχου H/Y

Όλες οι λειτουργίες του RDS συμπεριλαμβανομένων του κύκλοτρου και της μονάδας βιοσύνθεσης, ελέγχονται μέσα από την χρήση ενός προσωπικού υπολογιστή.

Η παραγωγή ενός συγκεκριμένου ραδιοϊσότοπου επιτυγχάνεται ακολουθώντας βήμα προς βήμα ένα σύνολο από επιλογές μενού στην οθόνη του τερματικού. Ο χειριστής επιλέγει ένα αντικείμενο από το μενού για να παράγει το επιθυμητό ραδιοϊσότοπο. Όλες οι άλλες διαδικασίες διεξάγονται αυτόματα. Ο χειρισμός του RDS είναι προσανατολισμένος στην παραγωγή του τελικού προϊόντος και όχι στην ρύθμιση των ενδιάμεσων παραμέτρων του επιταχυντή. Μια ξεχωριστή λειτουργία συντήρησης (maintenance mode) παρέχεται για την παρακολούθηση και έλεγχο καθενός τμήματος του όλου συστήματος ξεχωριστά.

Ο ολοκληρωμένος έλεγχος από υπολογιστή επιτρέπει την σημαντική μείωση των απαιτήσεων σε προσωπικό εξασφαλίζοντας έτσι πολύτιμο χρόνο για πιο σημαντικές εργασίες.

2.3 Βιοσύνθεση Ραδιονουκλεοτιδίων



Εικόνα 2.8 : Μονάδα βιοσύνθεσης ραδιονουκλεοτιδίων

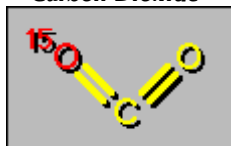
Η μονάδα βιοσύνθεσης (biosynthesizer unit) που απεικονίζεται παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει μια ποικιλία από κλινικά χρήσιμα ραδιοσημασμένα συστατικά. Τα ραδιοϊσότοπα που παράγονται από το κύκλοτρο μεταφέρονται στην μονάδα βιοσύνθεσης όπου και προσαρτώνται στους κλινικά χρήσιμους βιολογικούς ανιχνευτές.

2.3.1 Ιχνηθέτες PET (PET Tracers): Δομή και Λειτουργίες

2.3.1.1 Oxygen

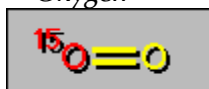
Το Oxygen-15 έχει χρόνο ημίσειας ζωής (half life time) 2.1 min.

Carbon Dioxide



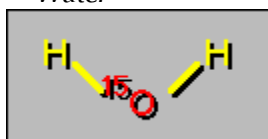
Το ραδιοσημασμένο νερό και το διοξείδιο του άνθρακα έχουν και τα δύο χρησιμοποιηθεί για την εξέταση τοπικής εγκεφαλικής αιματικής ροής.

Oxygen



Το [15O]-ραδιοσημασμένο νερό και οξυγόνο έχουν αξιολογηθεί για την ποσοτικοποίηση της κατανάλωσης οξυγόνου στο μυοκάρδιο. Το [15O]-σημασμένο οξυγόνο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της νέκρωσης ιστών.

Water

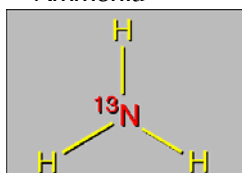


Το 15O-σημασμένο νερό και οξυγόνο έχουν αξιολογηθεί για την ποσοτικοποίηση της κατανάλωσης οξυγόνου στο μυοκάρδιο. Η χρήση του [15O]-σημασμένου νερού παρουσιάζει το πλεονέκτημα της 100% εξαγωγής των μικρών κλασμάτων στο μυοκάρδιο.

2.3.1.2 Nitrogen

Το Nitrogen-13 έχει χρόνο ημίσιας ζωής 10.0 min.

Ammonia

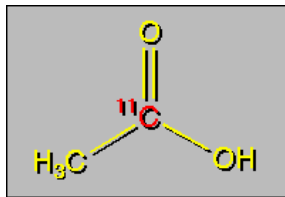


Η [13N]-σημασμένη αμμωνία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της ροής του αίματος. Ο ανιχνευτής μετακινείται από το κυκλοφορικό σύστημα στους ιστούς τόσο μέσω μηχανισμών ενεργής μεταφοράς (με οργανικές αντλίες) όσο και μέσω παθητικής διάχυσης. Μόλις εισέλθει στα κύτταρα μεταβολίζεται. Η [13N]-αμμωνία βρέθηκε ότι είναι άριστος μετρητής του τρόπου λειτουργίας του μυοκαρδίου τόσο σε φυσιολογικές όσο και σε παθολογικές καταστάσεις

2.3.1.3 Carbon

Ο άνθρακας-11 έχει χρόνο ημίσιας ζωής 20.4 min.

Acetate



Η ¹¹C-σημασμένη ακετάτη (acetate) χρησιμοποιείται για την μέτρηση του οξειδωτικού μεταβολισμού. Το κυριότερο καύσιμο για τον μεταβολισμό του μυοκαρδίου είναι τα λιπαρά οξέα και για αυτό αυτός ο ανιχνευτής είναι πολύ χρήσιμος στον καθορισμό της κατάστασης μεταβολισμού της καρδιάς

Στην συνέχεια απλά αναφέρουμε και κάποιους άλλους ανιχνευτές που σημαίνονται με άνθρακα και χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα :

- *Carfentanil,*
- *Cocaine*
- *Deprenyl*
- *Leucine*
- *Methionine*
- *N-Methylspiperone*
- *Raclopride*

2.3.14 Fluorine

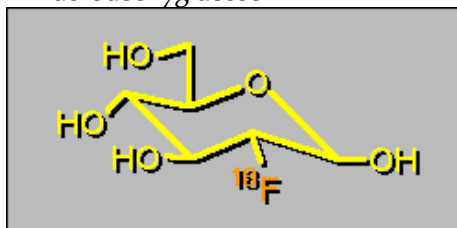
Το Fluorine-18 έχει χρόνο ημίσειας ζωής 109 min. .

Fluorine Ion



Το ραδιοσημασμένο ιόν φθορίου [¹⁸F⁻] ήταν κάποτε ο τυπικός ανιχνευτής για κλινική εξέταση PET του σκελετικού ιστού. Σήμερα εφαρμόζεται πολλές φορές και η τεχνική του SPECT με χρήση γάμμα κάμερας. Όμως επειδή το [¹⁸F⁻] έχει καλύτερη λόγο απορρόφησης από τον σκελετικό ιστό προς την αντίστοιχη απορρόφηση από τους υπόλοιπους μαλακούς ιστούς μπορεί να μας δώσει πιο ανατομικά και αριθμητικά ακριβή αποτέλεσμα από ότι εάν κάναμε χρήση γάμμα κάμερας.

Fluorodeoxyglucose



Η [18F]-σημασμένη 2-δεοξυγλυκόζη([18F-labeled 2-deoxyglucose) ή αλλιώς FDG όπως είναι ευρέως διαδεδομένη χρησιμοποιείται στην νευρολογία, στην καρδιολογία και στην ογκολογία για την εξέταση του μεταβολισμού της γλυκόζης. Στην καρδιολογία η [18F]-σημασμένη FDG μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση του τοπικού μεταβολισμού της γλυκόζης στο μυοκάρδιο και αυτό την καθιστά χρήσιμη στον εντοπισμό όγκων και στην ποσοτικοποίηση της FDG.

Άλλοι χρήσιμοι ανιχνευτές που σημαίνονται με το ραδιοϊσότοπο φθόριο 18 είναι η εξής:

- *Fluorodopa*
- *Fluoroethylspiperone*

2.3.1.5 Rubidium

Το Rubidium-82 έχει χρόνο ημίσειας ζωής 1.25 min.

82-Rubidium

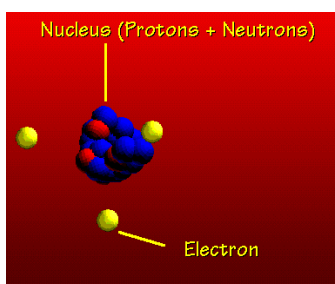


Το ^{82}Rb έχει χρησιμοποιηθεί για εξετάσεις που σχετίζονται με την επίδοση λειτουργίας του μυοκαρδίου. Ο σύντομος χρόνος ημίσειας ζωής που έχει (76sec) επιτρέπει για γρήγορες εναλλαγές μεταξύ εξετάσεων όπου την μια ο ασθενής βρίσκεται κάτω από συνθήκες έντασης (stress conditions) και στην άλλη χαλαρώνει.

2.4 Πυρηνική Φυσική και Τομογραφία

2.4.1 Εκπομπή Ποζιτρονίου και Ανακατασκευή Εικόνας

2.4.1.1 Εκπομπή ποζιτρονίων (Positron Emission)



Εικόνα 2.9: Ραδιοϊσότοπο

Το παραπάνω σχήμα αναπαριστά ένα ραδιοϊσότοπο που μπορεί να εκπέμψει ποζιτρόνια. (positron-emitting radioisotope). Τα ποζιτρόνια (β^+) είναι στην ουσία θετικά φορτισμένα ηλεκτρόνια. Εκπέμπονται από τον πυρήνα κάποιων ραδιοϊσοτόπων τα οποία είναι ασταθή επειδή έχουν περισσότερο αριθμό πρωτονίων από ότι ηλεκτρονίων και επομένως έχουν θετικό φορτίο. Η εκπομπή ποζιτρονίων σταθεροποιεί τον πυρήνα με την αφαίρεση του θετικού φορτίου μέσω της μετατροπής του πρωτονίου σε νετρόνιο. Μετά από αυτήν την μετατροπή, το νέο άτομο έχει ατομικό αριθμό μικρότερο κατά 1 σε σχέση με προηγουμένως. Για τα ραδιοϊσότοπα που χρησιμοποιούνται στην τεχνική απεικόνισης PET το στοιχείο που σχηματίζεται από την αποσύνθεση του ποζιτρονίου είναι σταθερό (δηλαδή μη ραδιενεργό).

Όλα τα ραδιοϊσότοπα που χρησιμοποιούνται στο PET αποσυντίθεται με εκπομπή ποζιτρονίων. Ένα ποζιτρόνιο το οποίο εκπέμπεται από ένα αποσυντιθέμενο πυρήνα ταξιδεύει μικρή απόσταση πριν συγκρουστεί με ένα ηλεκτρόνιο από ένα διπλανό άτομο.

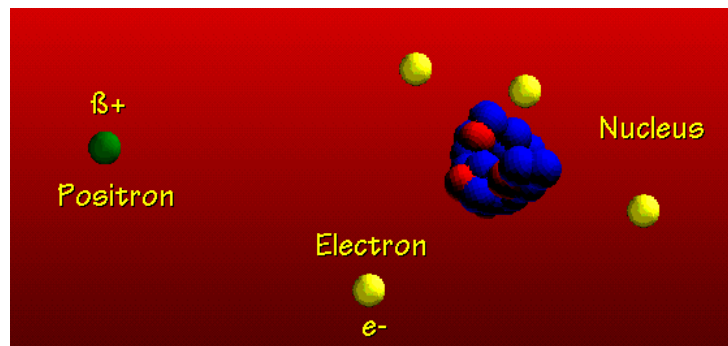


A diagram showing a green line with an arrow pointing to the right, representing the path of a positron. A green sphere is positioned on the line, representing the starting point of the positron's travel.

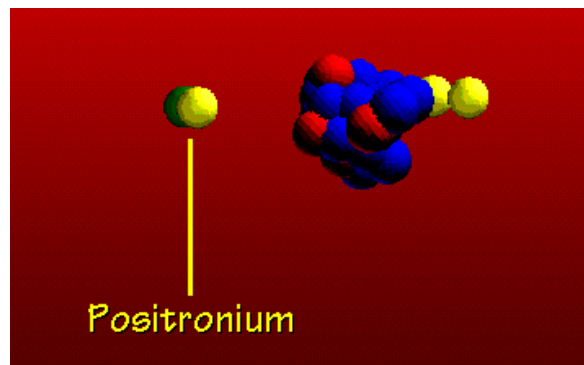
Isotope	Maximum Positron Range (mm)
F-18	2.6
C-11	3.8
Ga-68	9.0
Rb-82	16.5

Εικόνα 2.10 Μέγιστο βεληνεκές ποζιτρονίου

Η απόσταση που ένα ποζιτρόνιο ταξιδεύει εξαρτάται από την ενέργεια του.

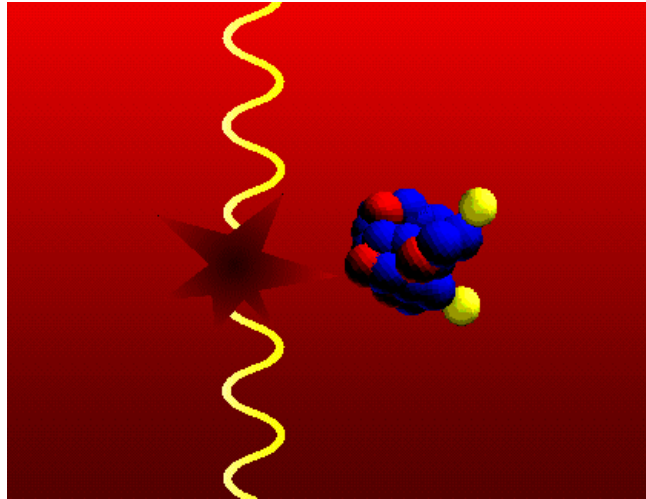


Εικόνα 2.11 : Αλληλεπίδραση ηλεκτρονίου με ποζιτρόνιο



Εικόνα 2.12 Σχηματισμός του positronium

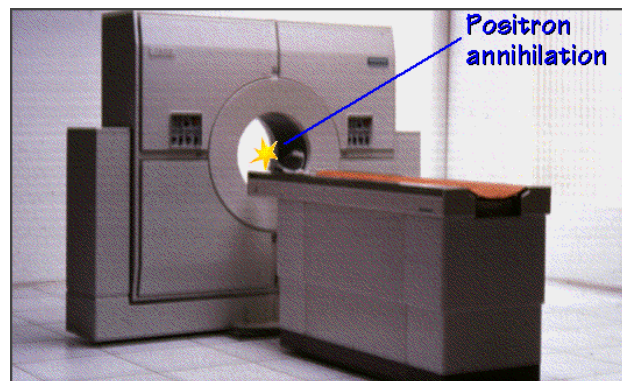
Το ποζιτρόνιο (positron) συνδυάζεται με ένα συνηθισμένο ηλεκτρόνιο ενός διπλανού ατόμου με μια αντίδραση εξουλώσεως (annihilation reaction) σχηματίζοντας το positronium.σαν ενδιάμεσο προσωρινό παράγωγο.



Εικόνα 2.13 : Εξαύλωση

Όταν το ποζιτρόνιο έρθει σε επαφή με ένα ηλεκτρόνιο, τα δύο σωματίδια εξαυλώνονται με αποτέλεσμα η μάζα και των δύο σωματιδίων να μετατρέπεται σε δύο ακτίνες γάμμα 511-keV η κάθε μια, οι οποίες εκπέμπονται από το σημείο της εξαύλωσης σχηματίζοντας γωνία 180-μοιρών μεταξύ τους. Αυτά τα φωτόνια εύκολα εξέρχονται από το ανθρώπινο σώμα και μπορούν να καταγραφούν από κατάλληλους εξωτερικούς ανιχνευτές (external detectors). Όταν ανιχνευθούν, η εκπομπή γωνίας 180-μοιρών των δύο ακτίνων γάμμα ονομάζεται γραμμή σύμπτωσης (coincidence line). Οι γραμμές σύμπτωσης παρέχουν ένα μοναδικό τρόπο ανίχνευσης για τον σχηματισμό τομογραφικών εικόνων με χρήση του PET.

2.4.1.2 Ανίχνευση εκπομπής (Emission Detection)

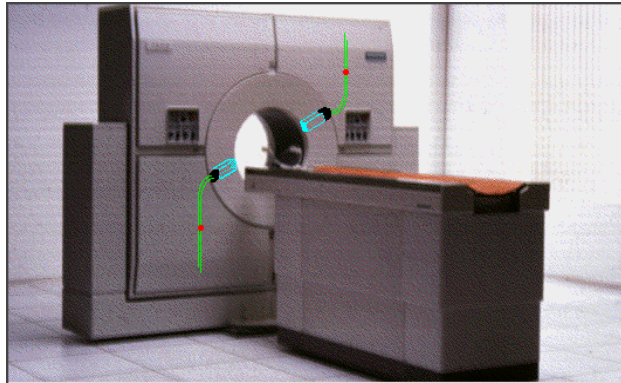


Εικόνα 2.14 : Θέση συμβάντος ως προς τον τομογράφο

Τώρα ας εξετάσουμε πως ο τομογράφος ανιχνεύει τις ακτίνες γάμμα ενέργειας 511keV η κάθε μια, οι οποίες εκπέμπονται από την εξαύλωση των ποζιτρονίων με τα ηλεκτρόνια. Σε μια εξέταση PET κάποιος εισάγει στον οργανισμό του εξεταζόμενου ραδιοϊσότοπο ικανό να εκπέμψει ποζιτρόνια. Το ισότοπε, στην συνέχεια, κυκλοφορεί διαμέσου του κυκλοφορικού συστήματος με σκοπό να φτάσει το όργανο το οποίο επιθυμούμε να εξετάσουμε, για παράδειγμα τον εγκεφαλικό ιστό ή τον καρδιακό μυ. Καθώς συμβαίνει εξαύλωση ποζιτρονίου, ο τομογράφος ανιχνεύει το ακριβές σημείο του ισότοπου όπως επίσης και την συγκέντρωση του στο σημείο αυτό.

Η γραμμή που εμφανίζεται μετά το συμβάν της εξαύλωσης αναπαριστά την εκπομπή δύο 511keV ακτίνων γάμμα που σχηματίζουν γωνία περίπου 180-μοιρών μεταξύ τους. Η δουλειά του τομογράφου είναι να ανιχνεύσει αυτές τις συμπτωτικές ακτίνες, γεγονός που δείχνει ότι το συμβάν της εξαύλωσης συνέβη κάπου κατά μήκος αυτής της γραμμής σύμπτωσης.

Όταν οι 511keV ακτίνες γάμμα αλληλεπιδράσουν με τους ευφυείς κρυστάλλους του PET που αποτελούνται συνήθως από BGO (Bismuth germanate) ή LSO , μετατρέπονται σε φωτόνια στην έξοδο των κρυστάλλων.

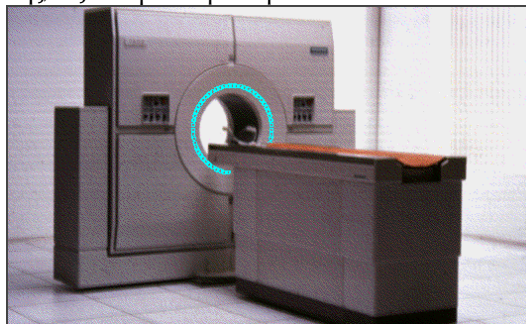


Εικόνα 2.15: Σχηματική αναπαράσταση της μετατροπής των φωτονίων σε ηλεκτρόνια στους ανιχνευτές του συστήματος απεικόνισης

Εδώ παρουσιάζεται στο σχηματικό τα φωτόνια τα οποία μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα τα οποία με την σειρά τους καταγράφονται από τα ηλεκτρονικά συστήματα του τομογράφου PET. Αυτή η διαδικασία μετατροπής και καταγραφής συμβαίνει σχεδόν ακαριαία έτσι ώστε τα συμβάντα εξαύλωσης να μπορούν να συγκριθούν ανάμεσα σε όλους τους αντικριστούς κρυστάλλους (κατά μήκος πολλών γραμμών σύμπτωσης)

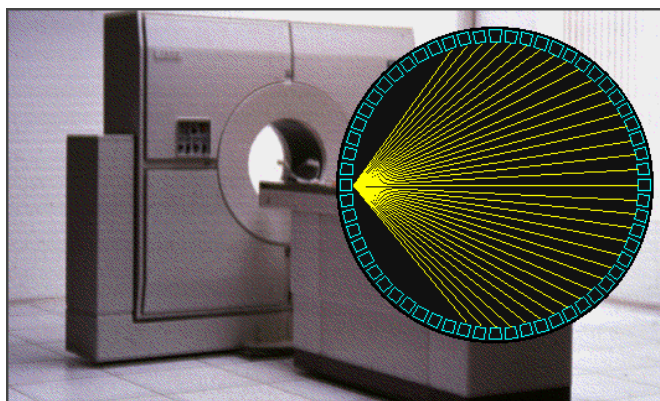
Η χωρική και χρονική κατανομή του ραδιοϊσοτόπου εκπομπής ποζιτρονίων εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο το υπό εξέταση όργανο το χειρίζεται βιοχημικά και φυσιολογικά. Εδώ οπτικοποιούνται τα συμβάντα εξαύλωσης και οι επακόλουθες εκπομπές ακτίνων-γ.

Έχοντας οπτικοποιήσει την ανίχνευση εκπομπής ποζιτρονίων και την διαδικασία καταγραφής των συμβάντων εξαύλωσης, ας δούμε τώρα την διαδικασία ανακατασκευής της εικόνας.



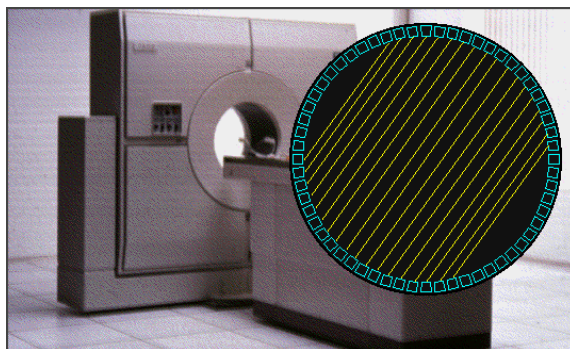
Εικόνα 2.16: Σχηματική αναπαράσταση του δακτυλίου των ανιχνευτών

Το δαχτυλίδι με τα τετράγωνα σχηματικά αναπαριστά ένα δαχτυλίδι από ανιχνευτές στον PET Scanner που μπορεί, για παράδειγμα, να έχει 15 τέτοια δαχτυλίδια για ταυτόχρονη τομογραφία πολλών διαξονικών τομών-φετών



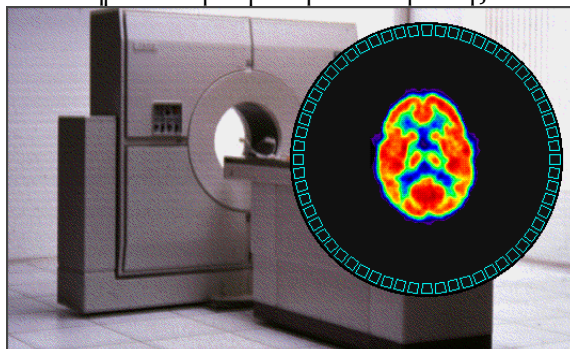
Εικόνα 2.17: Μονοπάτια δειγματοληψίας μορφής fan beam

Κάθε ανιχνευτής μπορεί να λειτουργήσει σε πολλαπλή σύμπτωση με πολλούς ανιχνευτές απέναντι από αυτόν, και σε αυτήν την περίπτωση ορίζουμε μονοπάτια δειγματοληψίας σε ένα εύρος πολλών γωνιών που σχηματίζουν ένα σχήμα παρόμοιο με μια βεντάλια (fan-beam response)



Εικόνα 2.18: Παράλληλα μονοπάτια δειγματοληψίας

Επίσης σε κάθε δοθείσα γωνία μπορούν να οριστούν πολλά παράλληλα σύμπτωσης μονοπάτια δειγματοληψίας. Το αποτέλεσμα είναι υψηλής ποιότητας γραμμική δειγματοληψία. Οι δύο παραπάνω τρόποι δειγματοληψίας που μπορούν , άλλωστε να συνδυαστούν και μεταξύ τους επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την ποιότητα της εικόνας.



Εικόνα 2.19: Ανακατασκευή εικόνας

Το λογισμικό ανακατασκευής εικόνας του τομογράφου, στην συνέχεια, λαμβάνει όλα τα συμβάντα σύμπτωσης που μετρήθηκαν σε όλες τις γωνιακές και γραμμικές θέσεις με σκοπό να ανακατασκευάσει την τελική εικόνα. Η εικόνα αυτή απεικονίζει την χωρική κατανομή και την συγκέντρωση του ραδιοϊσότοπου εκπομπής ποζιτρονίων μέσα σε μια περιοχή σάρωσης του υπό εξέταση οργάνου.

2.5 Instrumentation and Quality Control

2.5.1 Απαιτήσεις διακριτικής ικανότητας (Resolution Requirements)

- [Εισαγωγή ασθενούς \(Patient Throughput\)](#)
- [Οπτικό πεδίο - Field of View \(FOV\)](#)
- [Αποσπώμενοι δακτύλιοι \(Retractable Rings\)](#)
- [Αποσπώμενα Septa \(Retractable Septa\)](#)
- [Τομές Δακτυλίων \(Ring Planes\)](#)

Η χρήση του PET σε ένα κλινικό περιβάλλον απαιτεί διαφορετικά χαρακτηριστικά και επιδόσεις των οργάνων μέτρησης, του υλικού επεξεργασίας των δεδομένων και του λογισμικού επεξεργασίας σε σύγκριση με ένα αντίστοιχο σύστημα σε ένα ερευνητικό περιβάλλον. Η ανάλυση της απεικόνισης PET πρέπει να ρυθμίζεται έτσι ώστε και η εικόνα που εξάγεται να έχει υψηλή διαγνωστική αξία με χαμηλά επίπεδα θορύβου, αλλά και ο ασθενής και το προσωπικό να μην εκτίθεται σε επικίνδυνη ποσότητα ραδιενεργούς ακτινοβολίας. Για τις περισσότερες κλινικές εφαρμογές PET η διακριτική ικανότητα (resolution) των περίπου 6mm σε όλες τις χωρικές διευθύνσεις που παρατηρούνται στα περισσότερα σύγχρονα συστήματα PET είναι ικανοποιητική κι επαρκής. Σε αυτήν την ανάλυση, η υψηλής ποιότητας εικόνες μπορούν να ανακατασκευαστούν τελική ανάλυση εικόνα περίπου 8-10mm. Αυτά τα συστήματα έχουν επίσης απόσταση δειγματοληψίας περίπου 3mm σε όλες τις χωρικές διευθύνσεις. Η σχετικά ομοιόμορφη ανάλυση και δειγματοληψία αυτών των συστημάτων τα καθιστά κατάλληλα για αληθινή τρισδιάστατη ογκομετρική απεικόνιση (3-D volumetric imaging). Η απαίτηση αυτή είναι πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό στην καρδιακή απεικόνιση (cardiac imaging) για παράδειγμα, όπου είναι αναγκαίο να επαναπροσανατολίσεις τα δεδομένα της εικόνας σε προβολές μεγάλων αξόνων (long axis views)

I. Εισαγωγή ασθενούς (Patient Throughput)

Σε ένα κλινικό περιβάλλον, ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες είναι η εισαγωγή του ασθενούς. Ο καθένας θα ήθελε να ρυθμίσει τον PET scanner σχετικά γρήγορα για κάθε νέο ασθενή να συλλέξει τα απαραίτητα δεδομένα, να ανακατασκευάσει και να επεξεργαστεί τα δεδομένα της εικόνας, να παράγει ένα φιλμ με αλληλουχίες τομογραφικών εικόνων το οποίο θα συνοδεύεται και από κατάλληλη αναφορά και τελικά να αρχειοθετήσει τα κλινικά χρήσιμα δεδομένα. Το σύστημα θα πρέπει επίσης να είναι ικανό να συλλέξει δεδομένα με ποικίλους τρόπους όπως απλές, στατικές, δυναμικές, κατωφλιωμένες και ορθογραμμικές σαρώσεις.

II. Οπτικό πεδίο - Field of View (FOV)

Ένας PET scanner δεν θα πρέπει να σχεδιάζεται μόνο για να απεικονίζει ένα μόνο συγκεκριμένο όργανο, όπως για παράδειγμα τον εγκέφαλο ή την καρδιά, αλλά θα πρέπει να είναι ικανός να απεικονίσει κάθε όργανο του σώματος ακόμα και να υποστηρίξει σάρωση ολόκληρου του σώματος. Τα περισσότερα συστήματα PET, σήμερα, είναι συστήματα ολικού-σώματος (whole-body systems). Για παράδειγμα διαθέτουν ένα τυπικό διαξονικό (transaxial) οπτικό πεδίο των 60cm. Αυτό το οπτικό πεδίο (FOV) είναι επαρκές για να χειριστεί εξετάσεις της συντριπτικής πλειοψηφεί των ασθενών. Το αξονικό (axial) FOV των περισσότερων PET συστημάτων σήμερα περιορίζεται στα 10cm. Αυτό το σχετικά στενό FOV εισάγει κάποιους περιορισμούς στις απεικονιστικές διαδικασίες που διεξάγονται κλινικά. Επίσης απαιτεί πιο ακριβής τοποθέτηση του ασθενούς σε σύγκριση με τις συμβατικές διαδικασίες πυρηνικής φαρμακευτικής. (conventional medicine nuclear procedures). Για ένα σύστημα PET σε κλινικό περιβάλλον θα ήταν επιθυμητό να επεκταθεί η αξονική FOV σε 15-20cm. Αυτό θα επέτρεπε, για παράδειγμα, πλήρη απεικόνιση εγκεφάλου και καρδιάς σε ένα μόνο frame και πιο αποτελεσματική ολόσωμη απεικόνιση. Εφόσον όμως οι ανιχνευτές συνεισφέρουν σημαντικά στο συνολικό κόστος του PET scanner, μια τέτοια επέκταση θα έθετε το ζήτημα εάν θα ήταν αποδεκτό ένα ακόμα υψηλότερο κόστος για ένα σύστημα PET.

III. Αποσπώμενοι δαχτύλιοι - Retractable Rings

Τα αποσπώμενα δαχτυλίδια ανιχνευτών (Retractable ring - rod sources) μειώνουν σημαντικά την δόση ακτινοβολίας στην οποία υπόκειται ο τεχνικός που χειρίζεται το PET καθώς ελαττώνεται σε μεγάλο βαθμό η άμεση επαφή με υλικά υψηλής ραδιενεργής χωρητικότητας.

IV. Αποσπώμενα Septa - Retractable Septa

Παρόλο που αποσπώμενα septa δεν αποτελούν αναγκαίο χαρακτηριστικό ενός κλινικού συστήματος PET η εφαρμογή του μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα του συστήματος PET μέσα από την συλλογή περισσότερων συμπτωτικών τομών-φετών (coincidence planes). Όμως, δεδομένου ότι οι απαιτήσεις για μικρό χρόνο επεξεργασίας είναι ολοένα και μεγαλύτερες, αυτή η τεχνολογία έχει πολύ δρόμο ακόμη για να ωριμάσει.

V. Τομές/Φέτες δακτυλίων- Ring Planes

Τα σημερινά συστήματα PET έχουν μέχρι 16 δαχτυλίδια, παράγοντας ένα σύνολο από 31 διαξονικές φέτες (transaxial planes). Η ανάλυση είναι περίπου 5mm προς όλες τις διευθύνσεις. Αυτή η ανάλυση θεωρείται επαρκής για τις περισσότερες κλινικές εφαρμογές του PET. Με απόσταση δειγματοληψίας 3mm σε όλες τις διευθύνσεις, μπορούμε πλέον να διεξάγουμε εξετάσεις χωρίς καμία κίνηση των ανιχνευτών.

2.5.2 Επίδοση ρυθμού μέτρησης (Count Rate Performance)

Ένα σύστημα PET που χρησιμοποιείται σε κλινικό περιβάλλον θα πρέπει να είναι ικανό να χειρίζεται ένα μεγάλο εύρος ρυθμών μέτρησης (count rates), χωρίς σοβαρές απώλειες σε ανάλυση και γραμμικότητα ρυθμού μέτρησης (count rate linearity). Στα περισσότερα κλινικά πρωτόκολλα εξέτασης, όπως για παράδειγμα σε εγκεφαλικές σαρώσεις FDG ή εξετάσεις βιωσιμότητας καρδιάς με FDG ή NH₃, η προκαλούμενη δραστηριότητα δεν παράγει τόσο υψηλούς ρυθμούς μέτρησης ώστε να οδηγήσει τον PET scanner στα όρια των δυνατοτήτων του. Σε εξετάσεις υψηλών ρυθμών μετρήσεων, όπως για παράδειγμα στις μελέτες της καρδιάς με χρήση 82-Rb, η προκαλούμενη δραστηριότητα παράγει υψηλούς ρυθμούς μέτρησης ικανούς να προκαλέσουν καθυστέρηση απόκρισης (dead time) από το PET scanner. Τα περισσότερα συστήματα διαθέτουν ενσωματωμένα κυκλώματα διόρθωσης του dead time, πετυχαίνοντας, έτσι, μια γραμμική απόκριση στην προκαλούμενη δραστηριότητα. Όμως, σε αυτόν τους υψηλούς ρυθμούς μέτρησης ίσως να παρατηρηθούν κάποιες απώλειες στην ανάλυση εξαιτίας της συσσώρευσης συμβάντων (event pile-up).

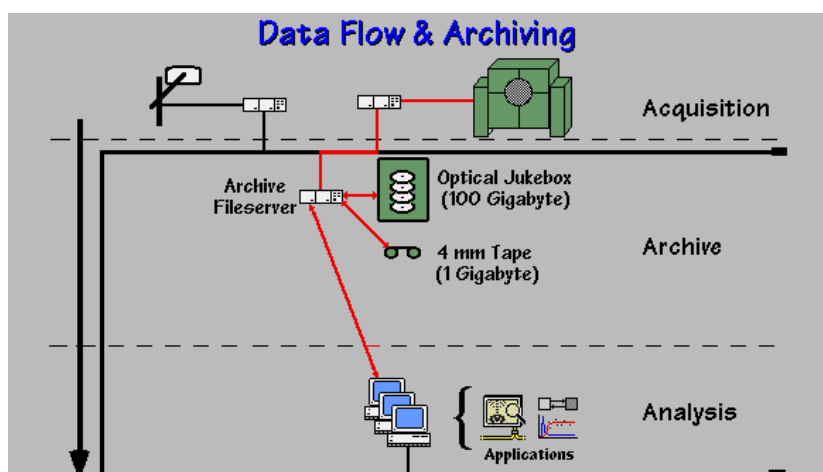
2.5.3 Λογισμικό λήψης δεδομένων (Acquisition Software)

Στο κλινικό περιβάλλον, συνήθως, μόνο ένα περιορισμένο σύνολο από καλά ορισμένα πρωτόκολλα εξέτασης χρησιμοποιείται. Για αυτό είναι επιθυμητό, για αυτές τις διαδικασίες εξέτασης να κατασκευάσουμε πρότυπα πρωτόκολλα (standard protocols) τα οποία αυτόματα ρυθμίζουν τον scanner για συλλογή και περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων. Χρησιμοποιώντας αυτές τις προκαθορισμένες διαδικασίες ρύθμισης του scanner, μια εξέταση μπορεί να αρχίσει γρηγορότερα. Ο τεχνικός δεν χρειάζεται να εισάγει μεγάλο αριθμό παραμέτρων, όπως χρόνους σάρωσης, αριθμός πλαισίων (number of frames), παραμέτρους ανακατασκευής και άλλες παραμέτρους επεξεργασίας. Χρησιμοποιώντας αυτά τα προκαθορισμένα πρωτόκολλα, το σύστημα είναι λιγότερο ευπαθές σε ανθρώπινα σφάλματα εισαγωγής παραμέτρων. Καθώς ορίζουμε όμως αυτά τα τυποποιημένα πρωτόκολλα, είναι πολύ σημαντικό να επιτρέπουμε κάποια ευελιξία όπως την αλλαγή κάποιων παραμέτρων σε ειδικές περιπτώσεις όπως για παράδειγμα τον χρόνο εξέτασης ή κάποιες παραμέτρους ανακατασκευής.

2.5.4 Λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων (Processing Software)

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό ενός κλινικού συστήματος PET (το οποίο πολλές φορές παραλείπεται) είναι η αναγκαιότητα για γρήγορα και αποτελεσματικό υλικό (hardware) και λογισμικό επεξεργασίας (processing software). Μετά την συλλογή των δεδομένων, το λογισμικό επεξεργασίας θα πρέπει να είναι σε θέση να παράγει μια ομάδα από πρώιμες εικόνες πριν την αποχώρηση του ασθενούς. Οι τελικές εικόνες θα πρέπει, για τις βασικές εξετάσεις, να έχουν ολοκληρωθεί μέσα σε 1 ώρα μετά το πέρας της εξέτασης. Αυτό απαιτεί το λογισμικό επεξεργασίας να είναι σε μεγάλο βαθμό αυτοματοποιημένο καθώς και όσο το δυνατόν λιγότερες επεμβάσεις από το τεχνικό προσωπικό. Σε μια κλινική PET όπου 8-10 ασθενείς εξετάζονται κάθε μέρα, είναι πολύ πιθανό να απομένει πολύ λίγος χρόνος επεξεργασίας της CPU του υπολογιστικού συστήματος συλλογής δεδομένων για την επεξεργασία προηγούμενων εξετάσεων. Επομένως, για να μπορεί το σύστημα PET να επεξεργαστεί όλα τα δεδομένα του ασθενή χρειάζονται επιπρόσθετες δυνατότητες επεξεργασίας. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση επιπρόσθετων σταθμών εργασίας (workstations). Αυτό με την σειρά του απαιτεί την κατάλληλη δικτύωση των υπολογιστικών συστημάτων για να επιτραπεί στα δεδομένα να ανταλλάσσονται ανάμεσα στην συστήματα συλλογής και επεξεργασίας του συστήματος PET.

2.5.5 Data Flow and Archiving



Εικόνα 2.20 Αποθήκευση ροής δεδομένων

Το συνοδευτικό διάγραμμα απεικονίζει ένα τυπικό δίκτυο Πυρηνικής Ιατρικής. Η ροή των δεδομένων γενικά κατευθύνεται από τα συστήματα συλλογής (acquisition) στο σύστημα αρχειοθέτησης (archiving) και τέλος στο σύστημα επεξεργασίας όπου γίνεται η ανάλυση της εικόνας (image analysis). Σε μια βασική εξέταση PET, όπως για παράδειγμα στατική εγκεφαλική σάρωση με χρήση FDG με 15 εικόνες, παράγονται περίπου 24 megabytes (MB) δεδομένων (συμπεριλαμβανομένων δεδομένων εξασθένησης, διόρθωσης, κανονικοποίησης, δεδομένων εκπομπής ποζιτρονίων και εικόνες). Από όλα αυτά τα δεδομένα μόνο 0,5 MB περιέχουν τα καθαρά δεδομένα εικόνες (π.χ. τις ανακατασκευασμένες εικόνες). Σε ένα κλινικό περιβάλλον, είναι απίθανο ότι όλα αυτά τα δεδομένα ροής (raw data) θα επανεπεξεργασθούν μετά την ανακατασκευή των τελικών εικόνων. Τα δεδομένα εικόνες, όμως, ανακτώνται και προσπελαύνονται συχνά, με σκοπό την σύγκριση των διάφορων εξετάσεων κάθε ασθενούς. Για αυτόν τον λόγο, είναι αναγκαία η αποθήκευση μόνο των δεδομένων εικόνας (image data) σε μια κατάλληλη μορφή έτσι ώστε να μπορούν να ανακτηθούν μέσα σε λίγα λεπτά. Τα δεδομένα ροής, αντιθέτως, μπορούν να αποθηκευτούν σε μέσα με μεγαλύτερο χρόνο προσπέλασης. Για μακροχρόνια αποθήκευση όλων των αρχείων, συμπεριλαμβανομένων και

των δεδομένων ροής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα αποθήκευσης υψηλής πυκνότητας και μικρής ταχύτητας ανάγνωσης όπως για παράδειγμα μια ταινία 4mm (4mm tape). Οι ταινίες επιτρέπουν γρήγορη αρχειοθέτηση και παρέχουν αξιόπιστη αποθήκευση σε πολύ μικρό κόστος. Σήμερα, η πιο λογική επιλογή για αποθήκευση δεδομένων εικόνας είναι οι οπτικοί (ή μαγνητο-οπτικοί) δίσκοι. Αυτοί οι δίσκοι είναι εύκολοι στον χειρισμό τους και τα δεδομένα μπορούν να ανακτηθούν σε δευτερόλεπτά μετά την εγκατάσταση του δίσκου. Η ικανότητα να έχουμε γρήγορη πρόσβαση στα δεδομένα καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική σε ένα περιβάλλον όπου τα φιλμ έχουν αντικατασταθεί από οθόνες Η/Υ. Η ανάλυση εικόνας και άλλα προγράμματα εφαρμογών που τρέχουν σε σταθμούς εργασίας (π.χ. Sun, Macintosh) μπορούν να προσπελάσουν την βάση δεδομένων του συστήματος αρχειοθέτησης για πληροφορίες αρχείων. Ξεχωριστά αρχεία μπορούν στην συνέχεια να αντιγραφούν σε έναν τοπικό δίσκο στον σταθμό εργασίας. Το σύστημα θα πρέπει να είναι ικανό να συλλέξει τα δεδομένα σε πολλές μορφές όπως με απλή, στατική, δυναμική κατωφλιωμένη και ορθογραμμική σάρωση

2.5.6 Εμφάνιση δεδομένων εικόνας (Display of Image Data)

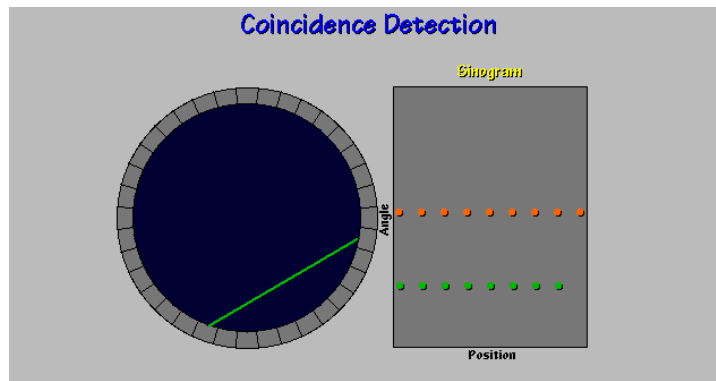
Ένα από τα τελευταία βήματα στην αλυσίδα επεξεργασίας μιας εξέτασης PET είναι η επιλογή του εποπτικού τρόπου παρουσίασης (δηλαδή η επιλογή του layout) των τελικών ανακατασκευασμένων εικόνων στον ιατρό που θα κάνει την διάγνωση. Ο συμβατικός τρόπος παρουσίασης των δεδομένων της εικόνας έγκειται στην δημιουργία ενός διαφανούς φιλμ (transparency x-ray film) των τελικών εικόνων σε μια οθόνη υπολογιστή. Εκτός από τα δεδομένα των εικόνων κάθε φιλμ θα πρέπει να σημαίνεται με τα δημογραφικά δεδομένα της εξέτασης όπως τα στοιχεία του ασθενούς και το είδος της σάρωσης. Εφόσον αυτές οι πληροφορίες συνήθως αποθηκεύονται στα αρχεία εικόνων μαζί με τα δεδομένα εικόνων, η σήμανση (labeling) και η εποπτική παρουσίαση (layout) των εικόνων κατά την εμφάνιση τους στην οθόνη του υπολογιστή μπορεί να αυτοματοποιηθεί με την χρήση κατάλληλου λογισμικού. Λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των τοπικών δικτύων (local area networks – LANs), τα φιλμ, ίσως, σύντομα να μην είναι απαραίτητα. Αντιθέτως, οι εικόνες θα μπορούν να διαβαστούν από ένα σύστημα οθόνων στο δωμάτιο μελέτης μιας κλινικής, το οποίο θα έχει πρόσβαση στα δεδομένα εικόνων του συστήματος PET διαμέσου ενός δικτύου υπολογιστών. Οι ιατροί χρειάζονται τις περισσότερες φορές ένα σκληρό αντίγραφο των αποτελεσμάτων της εξέτασης. Η ανάγκη αυτή μπορεί να ικανοποιηθεί με την χρήση x-ray φιλμ. Με τις τελευταίες εξελίξεις στην τεχνολογία εκτύπωσης, εικόνες υψηλής χρωματικής ποιότητας μπορεί να αποτελέσουν εναλλακτική λύση χαμηλού κόστους σε σχέση με το παραδοσιακά φιλμ.

2.5.7 Σφάλματα Υλικού (Hardware Artefacts)

- [Ανίχνευση σύμπτωσης \(Coincidence Detection\)](#)
- [Βλάβες Ανιχνευτών \(Detector Failure\)](#)
- [Βλάβες μνήμης \(Memory Failure\)](#)
- [Επεξεργασία Υλικού \(Processing Hardware\)](#)

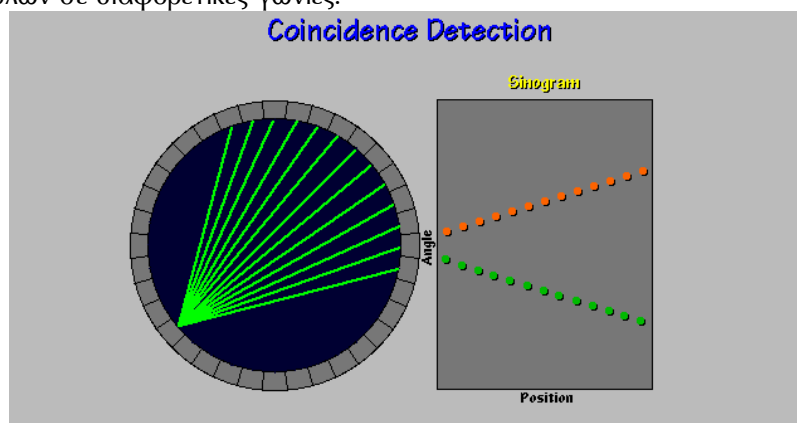
Η πιο συχνές πηγές σφαλμάτων μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις κύριες ομάδες: τα σφάλματα υλικού, σφάλματα συλλογής δεδομένων και σφάλματα λόγω επεξεργασίας δεδομένων. Για να μπορέσουμε να αναγνωρίσουμε τις πηγές των σφαλμάτων εικόνας που διακρίνουμε στις εικόνες PET, είναι πολύ σημαντικό να καταλάβουμε σε βάθος το σύστημα συλλογής δεδομένων καθώς και το υλικό που χρησιμοποιούμε για την επεξεργασία τους, στα διάφορα στάδια του συστήματος PET που μεσολαβούν μέχρι την παραγωγή της τελικής εικόνας.

2.5.7.1 Ανίχνευση σύμπτωσης - Coincidence Detection



Εικόνα 2.21 Ανίχνευση συμπτώσεων στην περίπτωση παράλληλων μονοπατιών δειγματοληψίας

Όταν ένα έγκυρο συμβάν ανιχνευθεί από ένα ζευγάρι ανιχνευτών, ταξινομείται σε ένα ημιτονόγραμμα (sinogram ή σινόγραμμα). Το ημιτονόγραμμα είναι μια μέθοδος αποθήκευσης των δεδομένων με τέτοιο τρόπο ώστε να χρησιμοποιηθούν για την ανακατασκευή της εικόνας. Εάν κοιτάξουμε για σύμβαντα σε όλες τις γραμμές σύμπτωσης που είναι παράλληλες σε συγκεκριμένη γωνία τότε σχηματίζουμε μια απλή όψη προβολής (projection view). Αυτή η όψη αποθηκεύεται στο ημιτονόγραμμα σαν μια απλή γραμμή. Εάν κοιτάξουμε σε κάποια άλλη ομάδα παράλληλων γραμμών σύμπτωσης για συγκεκριμένη γωνία διαφορετική από την προηγούμενη, τότε σχηματίζεται μια άλλη όψη προβολής που απεικονίζεται σε μια διαφορετική απλή γραμμή στο ημιτονόγραμμα. Όλες οι γραμμές στο ημιτονόγραμμα είναι όψεις προβολών σε διαφορετικές γωνίες.



Εικόνα 2.22: Ανίχνευση συμπτώσεων στην περίπτωση μονοπατιών δειγματοληψίας σχήματος fan beam

Εάν κοιτάξουμε προς όλες τις γραμμές σύμπτωσης για ένα συγκεκριμένο ανιχνευτή παρατηρούμε ότι αυτές σχηματίζουν μια βεντάλια. Στο ημιτονόγραμμα, αυτό οδηγεί στην αποθήκευση των δεδομένων κατά μήκος μια διαγώνιας γραμμής. Ανάλογα με την θέση του ανιχνευτή η κλίση της διαγώνιας γραμμής θα είναι θετική ή αρνητική.

2.6 Εφαρμογές της τεχνολογίας απεικόνισης PET.

Η απεικόνιση με χρήση ραδιονουκλεοτιδίων (radionuclide imaging) προσφέρει την δυνατότητα απόκτησης μεγάλης ευκρίνειας εικόνων πολλών σημαντικών οργάνων όπως είναι η καρδιά και ο εγκέφαλος. Για να σχηματίσουμε αυτές τις εικόνες, ελάχιστες ποσότητες ραδιενεργών ουσιών, που ονομάζονται ιχνηθέτες (tracers) εισάγονται στο σώμα του ασθενούς. Οι ιχνηθέτες εκπέμπουν ένα πολύ συγκεκριμένο είδος ενέργειας το οποίο ονομάζεται ακτινοβολία γάμμα (gamma rays) η οποία ανιχνεύεται από κατάλληλους αισθητήρες. Εμείς, σε αυτήν την ενότητα της εργασίας μας θα ασχοληθούμε με την τομογραφία εκπομπής

ποζιτρονίου (Positron Emission Tomography) που είναι ευρέως γνωστή με τα αρχικά **PET**. Η τεχνολογία απεικόνισης **PET** χρησιμοποιεί διατάξεις αισθητήρων (photomultiplier-scintillator detectors) για να ανιχνεύσει την ακτινοβολία γάμμα. Άλλες τεχνολογίες όπως η **τομογραφία εκπομπής απλού φωτονίου (Single Photon Emission Computed Tomography - SPECT)** χρησιμοποιούν γάμμα κάμερα (gamma camera) για να ανιχνεύσουν την ακτινοβολούμενη ενέργεια. Στην συνέχεια η ανιχνευόμενη πληροφορία αναλύεται και ανακατασκευάζεται από κατάλληλο λογισμικό αποσκοπώντας στην δημιουργία εικόνων υψηλής ευκρίνειας και σημαντικής διαγνωστικής αξίας της περιοχής ενδιαφέροντος.

Για την πλειοψηφία των εξεταζόμενων ο ραδιοιχνηθέτης είναι ακίνδυνος για την υγεία και απομακρύνεται από το σώμα μετά από την εξέταση. Όμως, υπάρχει ένας αριθμός εξεταζόμενων που θα πρέπει να αποφεύγουν την εξέταση με χρήση ραδιονουκλεοτιδίων. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι γυναίκες κατά την διάρκεια της εγκυμοσύνης και του θηλασμού. Επίσης άλλοι άνθρωποι που θα πρέπει να αποφεύγουν αυτήν την κατηγορία των απεικονιστικών τεχνικών όταν την εφαρμόζουν στην καρδιά, είναι όσοι υπόκεινται στις ακόλουθες καταστάσεις

- Μόλυνση του καρδιακού μυός (μυοκαρδίτιδα)
- Πρόσφατη πνευμονική λοίμωξη (pulmonary infection)
- Εξαιρετική στένωση της αορτικής βαλβίδας
- Εξαιρετική δυσλειτουργία της καρδιάς (severe heart failure)

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα αναφερθούμε στις εφαρμογές της τομογραφίας εκπομπής ποζιτρονίου για την εξέταση διαφόρων οργάνων του ανθρώπινου οργανισμού, όπως είναι ο εγκέφαλος και η καρδιά.

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως το PET είναι μια μοναδική μη επεμβατική (non invasive) απεικονιστική τεχνική με την οποία μπορούμε να παράγουμε τρισδιάστατες εικόνες της ζωντανής καρδιάς, του εγκεφάλου και άλλων οργάνων σε λειτουργία. Το PET κυρίως χρησιμοποιείται για την διάγνωση συγκεκριμένων εγκεφαλικών δυσλειτουργιών, καρδιακών ασθενειών καθώς και για την έγκαιρη διάγνωση του καρκίνου. Συγκεκριμένα το PET καρδιάς (cardiac PET scanning) είναι μια τεχνική παρόμοια με άλλα τεστ καρδιακής κοπώσεως που έχουν σαν σκοπό την διάγνωση της ύπαρξης και της σοβαρότητας ενός καρδιακού εμφράγματος. Όμως έχει δυο σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των υπόλοιπων πυρηνικών τεστ καρδιακής κοπώσεως.

Πρώτον, οι παραγόμενες εικόνες είναι λιγότερο πιθανό να παραμορφωθούν από τμήματα του εξεταζόμενου σώματος (λίπος, μεγάλο στήθος κτλ) και επομένως τα μη φυσιολογικά αποτελέσματα είναι αξιόπιστα και

Δεύτερον, το PET αποτελεί ένα εξαιρετικό εργαλείο για τον καθορισμό εάν συγκεκριμένα τμήματα του καρδιακού μυός είναι ακόμα βιώσιμα (ζωντανά και με φυσιολογική λειτουργία). Το PET έχει επίσης την δυνατότητα να υπολογίσει πόσο αποδοτικά λειτουργούν αυτά τα βιώσιμα τμήματα μετά από μια καρδιακή προσβολή ή άλλο καρδιακό επεισόδιο κατά το οποίο παρατηρήθηκε έλλειψη επαρκούς κυκλοφορίας αίματος πλούσιο σε οξυγόνο προς τον καρδιακό μυ.

Από την άλλη πλευρά, όμως, το PET δεν εφαρμόζεται σε τόσο μεγάλη κλίμακα, όπως οι άλλες τεχνικές απεικόνισης ραδιονουκλεοτιδίων, λόγω του υψηλού κόστους της μεθόδου και της ανάγκης χρησιμοποίησης κύκлотρου (cyclotron device) για την επί τόπου παραγωγή των ραδιοϊσότοπων πριν την εξέταση.

Ας αναφερθούμε στην συνέχεια σε ορισμένες πρακτικές λεπτομέρειες σχετικά με την τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων.

Οι τρισδιάστατες εικόνες που παράγονται με εφαρμογή του PET μας παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την ροή του αίματος, την συγκέντρωση οξυγόνου, τον μεταβολισμό της γλυκόζης και τις συγκεντρώσεις ποικίλων συστατικών επιλεγμένων οργάνων. Το PET προϋποθέτει την εισαγωγή ραδιενεργών ουσιών που δεν είναι επικίνδυνες εκτός και εάν ο ασθενής υπόκειται σε μια τουλάχιστον από τις καταστάσεις που προαναφέραμε προηγουμένως, στην εισαγωγή μας.

Οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως φυσικά συστατικά του οργανισμού μας όπως γλυκόζη, τα οποία «σημαδεύονται» (σημαίνονται) με μια μικρή ποσότητα ραδιενεργού υλικού. Για αυτόν τον λόγο, τα αποτελέσματα της εξέτασης PET για τους

διαβητικούς μπορεί να επηρεαστούν σημαντικά από τα επίπεδα σακχάρου στο αίμα του εξεταζόμενου. Οι εφαρμογές του PET σχετικά με την καρδιά περιλαμβάνουν την αξιολόγηση της λειτουργίας της και της ροής του αίματος προς αυτήν, με σκοπό να ανιχνευθούν πιθανές ενδείξεις δυσλειτουργίας της καρδιακής αρτηρίας (coronary artery disease). Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν σάρωση του εγκεφάλου για εντοπισμό τραυματισμού ή καρκινικού όγκου. Όπως και τα πυρηνικά τεστ κοπώσεως, έτσι και το PET μπορεί να βοηθήσει στην αναγνώριση ύπαρξης σωματιδίων που εμποδίζουν την σωστή καρδιακή λειτουργία και αποτελούν απόδειξη προηγούμενων καρδιακών εμφραγμάτων.

Το PET της καρδιάς είναι ένα είδος απεικόνισης με χρήση ραδιονουκλεοτιδίων που μπορεί να καθορίσει την ύπαρξη και την έκταση βλαβών στην καρδιακή αρτηρία. Εκτός από το ότι είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο για τον καθορισμό των βιώσιμων τμημάτων του μυοκαρδίου, έχει επίσης την δυνατότητα να διαγνώσει καρδιακές δυσλειτουργίες στα πρώιμα στάδια αυτών. Έχει αποδειχθεί ότι είναι πιο ευαίσθητη μέθοδος από το SPECT και το τεστ κοπώσεως με χρήση thallium καθώς οι δύο τελευταίες τεχνικές υπερεκτιμούν την έκταση της καρδιακής βλάβης κατά 30%. Το PET συνίσταται σε αυτές τις περιπτώσεις όταν άλλες μη-επεμβατικές τεχνικές (π.χ. ηχοκαρδιογράφημα) δεν οδηγούν σε οριστικές και σαφείς διαγνώσεις.

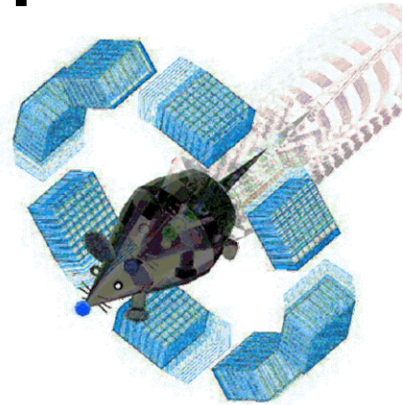
2.7 Σύγκριση τομογραφίας εκπομπής με άλλες τεχνολογίες απεικόνισης

Υπάρχουν ένας αριθμός από σημαντικές ομοιότητες και διαφορές μεταξύ ενός συστήματος PET και άλλων απεικονιστικών τεχνικών:

- Το PET, ο παραδοσιακός πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός (standard magnetic resonance imaging – MRI) και η παραδοσιακή υπολογιστική τομογραφία (traditional computed tomography – CT) παράγουν όλα εικόνες της ανατομίας του υπό εξέταση οργάνου. Όμως, μόνο το PET παρέχει εικόνες που μας πληροφορούν για τον τρόπο με τον οποίο το συγκεκριμένο όργανο λειτουργεί και όχι μια εικόνα που απλά έχει μόνο ανατομικές πληροφορίες. Αυτές οι λειτουργικές πληροφορίες χρησιμοποιούνται συνήθως για την ανίχνευση και παρακολούθηση διαφόρων δυσλειτουργιών, όπως της βλάβης της καρδιακής αρτηρίας στην περίπτωση όπου το υπό εξέταση όργανο είναι η καρδιά.
- Μαζί το PET και το SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) χρησιμοποιούν ραδιενεργούς ανιχνευτές για να παράγουν την εικόνα της λειτουργίας ενός οργάνου. Όμως, η εξέταση PET, αν και πιο ακριβής και αξιόπιστη, είναι πολύ μεγαλύτερου κόστους σε σχέση με το SPECT για αυτό και χρησιμοποιείται λιγότερο συχνά.
- Μαζί το PET, το SPECT και το καρδιακό αγγειόγραμμα μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό αρτηριακής στένωσης (αρτηρία με πολύ μικρή διατομή έως μπλοκαρισμένη). Όμως το PET ή το SPECT χρησιμοποιούνται συνήθως για μια αρχική αξιολόγηση και διάγνωση με σκοπό να αποφύγουμε το καρδιακό αγγειόγραμμα όπου είναι δυνατόν καθώς το PET και το SPECT είναι μη-επεμβατικές τεχνικές. Επιπλέον το SPECT είναι και σχετικά φθηνότερο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

GATE - GEANT4 Application for Tomographic Emission



3.1 Εισαγωγή

3.1.1 Πλεονεκτήματα σε σύγκριση με εναλλακτικά πακέτα λογισμικού προσομοίωσης

Η τομογραφία εκπομπής και ειδικότερα η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (PET) παρουσιάζει συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον στην μοντέρνα ιατρική τόσο για θεραπευτικούς όσο και για διαγνωστικούς σκοπούς. Παράλληλα υπάρχει η απαίτηση για υψηλότερη ποιότητα, ακρίβεια και ταχύτητα απεικόνισης. Συνεπώς καταγράφεται μια πολύ μεγάλη αύξηση των ερευνητικών προσπαθειών στον τομέα της πυρηνικής ιατρικής απεικόνισης. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo έχουν αναδειχθεί πλέον σε απαραίτητο εργαλείο για την τρέχουσα και μελλοντική ανάπτυξη της τεχνολογίας της τομογραφίας εκπομπής, ιδιαίτερα μετά την πρόσφατη αύξηση της διαθεσιμότητας σε ισχυρά καταναμημένα υπολογιστικά συστήματα (clusters). Παραδείγματα τέτοιας ανάπτυξης αποτελούν ο σχεδιασμός νέων εξελιγμένων ιατρικών απεικονιστικών συστημάτων, η βελτιστοποίηση πρωτοκόλλων συλλογής δεδομένων (acquisition protocols) καθώς και η ανάπτυξη και αξιολόγηση αλγορίθμων ανακατασκευής και τεχνικών διόρθωσης εικόνας.

Σήμερα, όπως αναφέραμε και στο πρώτο κεφάλαιο, υπάρχουν αρκετά πακέτα λογισμικού προσομοίωσης Monte Carlo με διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα το καθένα και επικυρωμένα τόσο για PET όσο και για SPECT σε διάφορα επίπεδα αξιοπιστίας. Πακέτα προσομοίωσης γενικού σκοπού τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακρίβεια και ευελιξία είναι διαθέσιμα εδώ και αρκετό χρόνο. Πιο πρόσφατο τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το Geant4. Τα πακέτα αυτά διαθέτουν καλά επικυρωμένα φυσικά μοντέλα, επαρκή εργαλεία γεωμετρικής μοντελοποίησης και αποδοτικά βοηθητικά προγράμματα οπτικοποίησης (visualization utilities). Όμως απαιτείται μεγάλη προσπάθεια για να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις των εφαρμογών PET και SPECT. Από την άλλη οι εξειδικευμένοι αλγόριθμοι (dedicated) Monte Carlo για PET και SPECT χαρακτηρίζονται από μια ποικιλία μειονεκτημάτων και περιορισμών όσον αφορά ζητήματα επικύρωσης, ακρίβειας και υποστήριξής τους. Συνεπώς, παρόλο που υπάρχει δυνατότητα προσαρμογής του λογισμικού EGS4 σε εφαρμογές σχεδιασμού ακτινοθεραπείας, δεν έχει αναπτυχθεί κανένα αξιόπιστο και ευέλικτο Monte Carlo πρόγραμμα που να επιτρέπει την ρεαλιστική προσομοίωση της γεωμετρίας των ανιχνευτών σε εφαρμογές τομογραφίας εκπομπής. Το πακέτο SimSET, ένας από τους πιο ισχυρούς εξειδικευμένους αλγόριθμους για PET και SPECT που έχει την ικανότητα να μοντελοποιεί με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα βασικές ανιχνευτικές διατάξεις (π.χ. δακτυλοειδής και επίπεδους ανιχνευτές) θέτει περιορισμούς στο σχήμα των διατάξεων που μπορεί να προσομοιώσει. Για παράδειγμα στο SimSET ένας ανιχνευτής-δακτύλιος δεν μπορεί να υποδιαιρεθεί σε ανεξάρτητους κρυστάλλους και επομένως τόσο τα κενά μεταξύ των κρυστάλλων όσο και η ομαδοποίηση τους σε blocks δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί. Επιπλέον ούτε το SimSET ούτε οι προηγούμενοι αλγόριθμοι λαμβάνουν υπ' όψη την παράμετρο του χρόνου με σαφήνεια, γεγονός που περιορίζει την χρήση τους για χρονικά εξαρτημένες διαδικασίες όπως κινητική μελέτη ιχνηθετών και κίνηση εξεταστικής τράπεζας.

Τέλος κανένας εξειδικευμένος αλγόριθμος δεν διαθέτει την δενδρική δομή του Geant4 που επιτρέπει ευκολία στην χρήση και μελλοντική επεκτασιμότητα και βελτίωση. Από όλα τα παραπάνω γίνεται σαφές πως ένα Monte Carlo εργαλείο ικανό να υποστηρίξει πολύπλοκες γεωμετρίες σάρωσης, ενώ παράλληλα διατηρεί τις ικανότητες μοντελοποίησης φυσικών διεργασιών των αλγορίθμων γενικού σκοπού είναι απαραίτητο.

Το GATE, η εφαρμογή του Geant4 στην τομογραφία εκπομπής όπως υποδηλώνουν και τα αρχικά της ονομασίας του, ενσωματώνει όλες τις βιβλιοθήκες του Geant4 σε μια δενδρική, ευέλικτη και εύκολη στην χρήση εργαλειοθήκη που είναι προσαρμοσμένοι ειδικά στον τομέα της Πυρηνικής Ιατρικής. Επιπλέον το GATE επιτρέπει την ακριβή περιγραφή χρονικά εξαρτημένων φυσικών φαινομένων όπως κίνηση πηγής ή ανιχνευτών και κινητική συμπεριφορά της πηγής. Αυτή η ικανότητα να συγχρονίζει χρονικά εξαρτημένα στοιχεία επιτρέποντας την συγκροτημένη περιγραφή της διαδικασίας συλλογής δεδομένων είναι μια από τις πιο πρωτοποριακές ιδιότητες του GATE.

3.1.2 Ιστορική αναδρομή

Η προέλευση του GATE εντοπίζεται σε ένα workshop τον Ιούλιο του 2001 στο Παρίσι στο οποίο είχαν συμμετάσχει αρκετές ερευνητικές ομάδες (research groups) με κοινό παρονομαστή το έντονο ενδιαφέρον τους για τις προσομοιώσεις Monte Carlo. Το κύριο θεματικό αντικείμενο του workshop ήταν το μέλλον των Monte Carlo προσομοιώσεων στην Πυρηνική Ιατρική. Συζητήθηκε το πλήθος των μειονεκτημάτων και των περιορισμών των μέχρι τότε αναπτυγμένων αλγορίθμων γενικού και ειδικού σκοπού. Από αυτές τις συζητήσεις έγινε σαφές πως θα ήταν χρήσιμο για όλους να αναπτυχθεί μια εργαλειοθήκη λογισμικού προσομοίωσης που να συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο κόσμων. Με άλλα λόγια να δημιουργηθεί άμεσα μια πλατφόρμα Monte Carlo για τομογραφία εκπομπής η οποία θα έχει την δυνατότητα από την μια να μοντελοποιεί κινητικά χαρακτηριστικά πηγής, deadtime και κίνηση και από την άλλη να επωφελείται από την ευελιξία, προσαρμοστικότητα και ευρεία υποστήριξη των αλγορίθμων γενικού σκοπού. Επιπρόσθετα, η αντικειμενοστραφείς τεχνολογία φαινόταν να είναι η καλύτερη επιλογή για την ανάπτυξη των εργαλείων λογισμικού ειδικά για PET και SPECT αφού η χρήση της θα εξασφάλιζε μια ευέλικτη δομή που θα μπορούσε να επεκταθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί εύκολα. Επομένως το αποτέλεσμα

ήταν να αποφασιστεί το νέο πακέτο λογισμικού να αναπτυχθεί σε C++ από την Geant4 Collaboration και να προγραμματιστεί μια μακροπρόθεσμη διαδικασία υποστήριξης και συντήρησής του από πολλές ερευνητικές ομάδες.

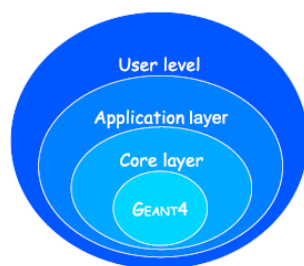
Η προσπάθεια αυτή ξεκίνησε από την Λοζάνη, αρχικά σαν βοήθεια για τον σχεδιασμό του πρωτότυπου ClearPET της ClearPET Collaboration. Οδηγίες για το βασισμένο σε Geant4 πλαίσιο προσομοίωσης εκδόθηκαν τον Δεκέμβριο του 2001. Ο προγραμματισμός σε κώδικα C++ ξεκίνησε στο Lausanne PET instrumentation group με την βοήθεια του Geant4 Low Energy Electromagnetic Physics working group, του Clermont-Ferrand corpuscular physics for life science group και του Medical Image and Signal Processing Group του Ghent University. Η στρατηγική ανάπτυξης του λογισμικού ορίστηκε σε ένα δεύτερο workshop που οργανώθηκε στην Λοζάνη τον Ιανουάριο του 2002. Στις 23 Μαΐου 2002, στην πρώτη συνάντηση του OpenGATE πραγματοποιήθηκε επίδειξη της πρώτης έκδοσης της πλατφόρμας του GATE. Τότε οι ερευνητικές ομάδες της Λοζάνης, του Clermont-Ferrand και τοι Ghent αποφάσισαν να ιδρύσουν το OpenGATE Collaboration με στόχο την βελτίωση, επικύρωση, δοκιμή και εκπαιδευτική υποστήριξη του GATE εν' όψη της προετοιμασίας για την δημόσια διάθεση του λογισμικού.

3.2 Επισκόπηση της αρχιτεκτονικής του GATE

Το GATE συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των καλά επικυρωμένων φυσικών μοντέλων του Geant4, της έξυπνης γεωμετρικής περιγραφής και των ισχυρών εργαλείων οπτικοποίησης με νέα χαρακτηριστικά ειδικά σχεδιασμένα για τομογραφία εκπομπής. Αποτελείται από αρκετές εκατοντάδες κλάσεων της C++.

Η αρχιτεκτονική του GATE ακολουθεί την φιλοσοφία της διαστρωμάτωσης. Οι μηχανισμοί που διαχειρίζονται τον χρόνο, την γεωμετρία και τις ραδιενεργές πηγές σχηματίζουν το στρώμα πυρήνα (core layer) που αποτελείται από κλάσεις της C++ κοντά στον πυρήνα του Geant4.

Πάνω από το στρώμα πυρήνα βρίσκεται το στρώμα εφαρμογών (application layer) του GATE το οποίο επιτρέπει την υλοποίηση των κλάσεων που ορίζει ο χρήστης στο στρώμα χρήστη και οι οποίες προέρχονται από το στρώμα πυρήνα. Έτσι το στρώμα εφαρμογών αναλαμβάνει την κατασκευή ειδικών σχημάτων γεωμετρικών όγκων και/ή ειδικές λειτουργίες πάνω σε αυτούς όπως για παράδειγμα περιστροφές και μεταθέσεις. Αφού το στρώμα εφαρμογών υλοποιεί όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του GATE, η χρήση του πακέτου προσομοίωσης δεν απαιτεί προγραμματισμό σε C++ : ένας ειδικός μηχανισμός ανάθεσης εντολών (scripting), όπου στην συνέχεια θα αναφέρεται ως γλώσσα μακροεντολών, και ο οποίος επεκτείνει τον διερμηνέα εντολών του Geant4, καθιστά δυνατό τον έλεγχο Monte Carlo προσομοιώσεων με πραγματικές ρεαλιστικές ρυθμίσεις.



Εικόνα 3.1: Αρχιτεκτονική του GATE

Ένα από τα πιο πρωτοποριακά χαρακτηριστικά του GATE είναι η ικανότητα του να συγχρονίζει όλα τα χρονικά εξαρτημένα φαινόμενα αποσκοπώντας σε μια συνεκτική, λογική περιγραφή της διαδικασίας συλλογής των δεδομένων. Όσον αφορά την γεωμετρία, κάθε στοιχείο της γεωμετρίας μπορεί να τεθεί σε κίνηση μέσω μακροεντολών. Όλες οι κινήσεις των

στοιχείων παραμένουν συγχρονισμένες με την εξέλιξη της ενεργότητας των πηγών. Για τον σκοπό αυτό, η διαδικασία συλλογής δεδομένων υποδιαιρείται σε ένα πλήθος χρονικών βημάτων κατά την διάρκεια των οποίων τα στοιχεία της γεωμετρίας μπορούν να θεωρηθούν ακίνητα. Χρόνοι αποδιέγερσης παράγονται μέσα σε αυτά τα χρονικά πλαίσια έτσι ώστε ο αριθμός των συμβάντων (events) να μειώνεται εκθετικά όχι μόνο από το ένα χρονικό πλαίσιο στο επόμενο αλλά και μέσα σε κάθε πλαίσιο σύμφωνα με τα κινητικά χαρακτηριστικά του κάθε ραδιοϊσότοπου. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει την μοντελοποίηση χρονικά εξαρτημένων διαδικασιών όπως ρυθμοί μετρήσεων (count rates), τυχαία συμβάντα σύμπτωσης (random coincidences) ή dead time ανιχνευτή για κάθε συμβάν.

Επιπλέον το ιστορικό αλληλεπιδράσεων του GATE μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πιστή αναπαράσταση της πραγματικής εξόδου του ανιχνευτή. Στο GATE η ηλεκτρονική απόκριση κάθε ανιχνευτή μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μια γραμμική αλυσίδα επεξεργασίας σήματος. Η αλυσίδα αυτή κατασκευάζεται από τον χρήστη με σκοπό την αναπαραγωγή στην προσομοίωση της παρεμβολής (cross-talk) μεταξύ ανιχνευτών και της ενεργειακής ανάλυσης (energy resolution) .

3.3 Αρχιτεκτονική προσομοίωσης στο GATE

Κάθε προσομοίωση στο GATE χαρακτηρίζεται από μια διατεταγμένη σειρά βημάτων που στο σύνολο τους συνθέτουν την αρχιτεκτονική προσομοίωσης που ακολουθεί το GATE. Συγκεκριμένα ο χρήστης θα πρέπει να ακολουθήσει τα παρακάτω βήματα με την σειρά που παρατίθενται:

- 1) να ορίσει την γεωμετρία της ανιχνευτικής διάταξης
- 2) να ορίσει την γεωμετρία του phantom
- 3) να ρυθμίσει τις παραμέτρους των φυσικών διαδικασιών
- 4) να αρχικοποιήσει την προσομοίωση
- 5) να καθορίσει το σύστημα ανίχνευσης
- 6) να ορίσει την(τις) πηγή(πηγές)
- 7) να επιλέξει την μορφή των δεδομένων εξόδου
- 8) να ξεκινήσει την συλλογή δεδομένων

Τα βήματα 1 έως 4 αφορούν την αρχικοποίηση της προσομοίωσης (Λειτουργία αρχικοποίησης, Prelim mode). Μετά την αρχικοποίηση ακολουθούν τα βήματα 5-8 (IDLE mode) στα οποία η γεωμετρία δεν μπορεί πλέον να μεταβληθεί. Στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούμε συνοπτικά σε καθένα από τα βήματα αυτά.

3.3.1 Διεπαφή χρήστη: η γλώσσα μακροεντολών

Το GATE, όπως και το Geant4, είναι ένα πρόγραμμα, στο οποίο η διεπαφή χρήστη βασίζεται σε χρήση ειδικών προκαθορισμένων μακροεντολών. Για την εκτέλεση ενεργειών ο χρήστης θα πρέπει είτε να εισάγει εντολές με διαδραστικό τρόπο (interactive mode) είτε να κατασκευάσει ένα αρχείο μακροεντολών (macro file) που θα περιέχει ένα διατεταγμένο σύνολο εντολών.

Κάθε εντολή καλεί και συγκεκριμένη συνάρτηση και ίσως απαιτεί μια ή περισσότερες παραμέτρους. Οι εντολές του GATE είναι οργανωμένες σε δενδρική δομή ανάλογα με την συνάρτηση την οποία αντιπροσωπεύουν. Για παράδειγμα, όλες οι εντολές που καθορίζουν την γεωμετρία της προσομοίωσης ξεκινούν με "/geometry/" και βρίσκονται κάτω από τον κλάδο "/geometry/" της δενδρικής δομής.

Όταν το GATE κληθεί σε περιβάλλον Linux και εκκινήσει, εμφανίζεται το prompt:

```
Prelim>
```

Στο στάδιο αυτό ο διεργηγέας εντολών του GATE είναι ενεργός και άρα όλες οι εντολές που εισάγονται θα ερμηνευθούν και θα εκτελεστούν σε πραγματικό χρόνο (on-line). Όλες οι

συναρτήσεις του GATE μπορούν να προσπελαστούν με χρήση των γραμμών εντολών. Η γεωμετρία του συστήματος, η περιγραφή των ραδιενεργών πηγών, οι φυσικές αλληλεπιδράσεις που ορίζονται κτλ. Μπορούν να παραμετροποιηθούν με χρήση των γραμμών εντολών, οι οποίες με την σειρά τους μεταφράζονται στον πυρήνα του GATE από τον διερμηνέα εντολών. Με αυτόν τον τρόπο, η προσομοίωση ορίζεται ένα βήμα κάθε φορά και η ίδια η κατασκευή της γεωμετρίας και ο ορισμός της προσομοίωσης μπορούν να παρακολουθηθούν on-line. Εάν το αποτέλεσμα δεν είναι το επιθυμητό ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επανεισάγει την σωστή εντολή on-line.

3.4 Εργαλεία οπτικοποίησης

Οι επιλογές οπτικοποίησης που διαθέτει το GATE έχουν την ίδια λειτουργικότητα με την αντίστοιχη του Geant4. Οι περισσότερες επιλογές στο Geant4 για την οπτικοποίηση της γεωμετρίας των ανιχνευτών, της τροχιάς των σωματιδίων και άλλων χαρακτηριστικών της προσομοίωσης είναι διαθέσιμα και στο GATE. Τα συστήματα γραφικών που μπορούν να επιλεγούν είναι τα ακόλουθα:

DAWNFILE, VRMLFILE (Έκδοση 1 και 2) καθώς και το OpenGL σε δυο καταστάσεις λειτουργίας (modes) την κατάσταση αποθήκευσης (stored mode) και την κατάσταση άμεσης λειτουργίας (immediate mode). Σε κάθε περίπτωση το OpenGL απαιτείται ως εξωτερική βιβλιοθήκη.

Στην περίπτωση φόρτωσης ψηφιακών εικόνων η χρήση του OpenGL ImmediateX εργαλείου αποδείχθηκε πιο αποδοτική. Όσον αφορά την χρήση των βιβλιοθηκών του DAWN και του VRML θα πρέπει να σημειωθεί ότι πολύπλοκες γεωμετρίες απαιτούν πολύ χρόνο για την οπτικοποίησή τους όπως στην περίπτωση ενός cylindricalPET συστήματος όπου έχουμε έναν πολύ μεγάλο αριθμό κρυστάλλων-ανιχνευτών. Για να ελαττώσουμε το μέγεθος του αρχείου και να επιταχύνουμε την οπτικοποίηση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω εντολή

```
/gate/crystal/vis/setVisible 0
```

Τώρα οι ανεξάρτητοι κρύσταλλοι δεν σχεδιάζονται και οπτικοποιείται μόνο το περίγραμμα του σχήματός τους, δηλαδή το πλέγμα τους (wireframe)

3.4.1 Οπτικοποίηση με το OpenGL

Επιλέγουμε συνήθως να ανοίξουμε έναν OpenGL StoredX viewer ο οποίος είναι και ο προκαθορισμένος viewer στο GATE.

```
/vis/open OGLSX
```

Εναλλακτικά επιλέγουμε τον OpenGL ImmediateX viewer που χρησιμοποιείται για ψηφιακές εικόνες.

```
/vis/open OGLIX
```

Στην συνέχεια ορίζουμε τον παράγοντα εστίασης (zoom factor).

```
/vis/viewer/zoom 1.5
```

ρυθμίζουμε την γωνία θέασης (viewing angle)

```
/vis/viewer/viewpointThetaPhi 5 60
```

και τον τρόπο σχεδίασης

```
/vis/viewer/set/style surface
```

Στην συνέχεια ξεκινούμε την σχεδίαση των αντικειμένων (volumes)

```
/vis/drawVolume
```

Οι τροχιές (trajectories) των σωματιδίων για κάθε τρέξιμο της προσομοίωσης θα πρέπει να σχεδιάζονται όλες μαζί. Για αυτό αναθέτουμε την παράμετρο 1 στην ακόλουθη εντολή.

```
/tracking/storeTrajectory 1
```

Εάν θέλουμε μετά από κάθε συμβάν να ανανεώνεται η οπτικοποίηση των προσπτώσεων (hits) και των διαδρομών κάθε σωματιδίου τότε χρησιμοποιούμε την εντολή

```
/vis/scene/endofEventAction refresh
```

Αλλιώς τα παραπάνω στοιβάζονται και οπτικοποιείται το αποτέλεσμα στο τέλος της προσομοίωσης

```
/vis/scene/endOfEventAction accumulate
```

Οι ακόλουθες εντολές υλοποιούν επιπλέον επιλογές οπτικοποίησης στο GATE. Συγκεκριμένα εάν θέλουμε να σχεδιάσουμε ένα αντικείμενο (στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχει όνομα block) σε μορφή πλέγματος τότε χρησιμοποιούμε την ακόλουθη εντολή

```
/gate/block/vis/forceWireframe
```

Ενώ εάν θελήσουμε να το σχεδιάσουμε συμπαγές χωρίς να φαίνεται το εσωτερικό του τότε

```
/gate/block/vis/forceSolid
```

Επίσης για να καθορίσουμε το χρώμα του αντικειμένου υπάρχει η ακόλουθη εντολή:

```
/gate/block/vis/setColor blue
```

3.5 Ορισμός γεωμετρίας

Ο γεωμετρικός ορισμός είναι ένα καθοριστικό βήμα για την σχεδίαση μιας προσομοίωσης διότι από την γεωμετρία περιγράφονται οι συσκευές απεικόνισης και τα αντικείμενα τους. Τα σωματίδια ακολούθως διατρέχουν και αλληλεπιδρούν με στοιχεία της γεωμετρίας.

3.5.1 Ο κόσμος της προσομοίωσης (world)

Ο κόσμος είναι το μοναδικό αντικείμενο που είναι ήδη ορισμένο στο GATE όταν δημιουργούμε ένα αρχείο μακροεντολών. Στην συνέχεια όλα τα αντικείμενα ορίζονται ως κόρες πρώτου (daughters), δεύτερου (grand-daughters) κτλ βαθμού. Το αντικείμενο world είναι ένα τυπικό παράδειγμα προκαθορισμένου αντικειμένου στο GATE και έχει προκαθορισμένες ιδιότητες. Έχει σχήμα κύβου (box) και είναι τοποθετημένο στην αρχή των αξόνων (origin) του συστήματος συντεταγμένων του GATE. Για κάθε σωματίδιο το οποίο δραπετεύει από τον

world παύει η αναζήτηση του από το GATE. Ο world μπορεί να έχει οποιοδήποτε μέγεθος και θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος για να περιέχει όλα τα αντικείμενα τα οποία συμμετέχουν στην προσομοίωση.

Το πρώτο αντικείμενο που θα οριστεί θα πρέπει να είναι daughter του αντικειμένου world. Κάθε αντικείμενο θα πρέπει να περιλαμβάνεται μέσα στον world. Ουσιαστικά η γεωμετρία κατασκευάζεται βασιζόμενη στο αντικείμενο world.

Ο world έχει αρχικά προκαθορισμένες παραμέτρους: σχήμα, διαστάσεις, υλικό, παράμετροι οπτικοποίησης, ιδιότητες και αριθμός παιδιών. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών επιστρέφονται με χρήση της εντολής

Όλες οι παράμετροι μπορούν να τροποποιηθούν για να προσαρμοστούν στις ρυθμίσεις κάθε προσομοίωσης εκτός από το σχήμα που παραμένει πάντα κύβος.

/gate/world/describe

3.5.2 Δημιουργία αντικειμένου στο GATE.

Δημιουργία δένδρου

Όταν ένα αντικείμενο δημιουργείται στο GATE εμφανίζεται αυτόματα στο δενδρική δομή του GATE. Όλες οι εντολές που μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτό το αντικείμενο γίνονται διαθέσιμες από το δένδρο του GATE. Επομένως εάν το όνομα του νέου αντικειμένου είναι *Volume_Name* όλες οι εντολές που μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτό ξεκινούν ως εξής:

/gate/Volume_Name/

Στην περίπτωση αυτή το δένδρο περιλαμβάνει τις ακόλουθες εντολές

setMaterial: Αναθέτει στο αντικείμενο το υλικό από το οποίο αποτελείται

attachCrystalSD: Συνδέει έναν κρύσταλλο-ανιχνευτή (crystal-SensitiveDetector) στο αντικείμενο

attachPhantomSD: Συνδέει έναν phantom-ανιχνευτή (phantom-SensitiveDetector) στο αντικείμενο

enable: Ενεργοποιεί το αντικείμενο

disable: Απενεργοποιεί το αντικείμενο

describe: Περιγράφει το αντικείμενο

Το δένδρο περιλαμβάνει υποδένδρα που σχετίζονται με διαφορετικές ιδιότητες του αντικειμένου *Volume_Name*. Τα διαθέσιμα υποδένδρα σε αυτήν την περίπτωση είναι

daughters/: Εισάγει ένα νέο "daughter" στο αντικείμενο

geometry/: Καθορίζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου

vis/: Καθορίζει τις ιδιότητες εμφάνισης του αντικειμένου

repeaters/: Εφαρμόζει έναν νέο κανόνα επανάληψης (repeater) στο αντικείμενο

moves/: Καθορίζει τα χαρακτηριστικά κίνησης του αντικειμένου

placement/: Καθορίζει την θέση του αντικειμένου στον χώρο του GATE.

Σύστημα συντεταγμένων

Κάθε σημείο στο GATE μπορεί να προσδιοριστεί με την χρήση τριών συντεταγμένων X, Y,Z. Οι μπορούν να εμφανιστούν με χρήση της ακόλουθης εντολής

/gate/world/daughters/insert 3axes

Δεν πρέπει όμως να συμπεριλαμβάνονται ως αντικείμενα στις προσομοιώσεις διότι δεν συμμορφώνονται προς τους κανόνες του Geant4 και επομένως είναι πιθανό να οδηγήσουν σε λανθασμένα αποτελέσματα.

Δημιουργώντας ένα αντικείμενο στο GATE

Ένας βασικός κανόνας της αρχιτεκτονικής του GATE είναι ότι κάθε νέο αντικείμενο θα πρέπει να είναι daughter κάποιου ήδη υπάρχοντος αντικειμένου. Στην κορυφή της ιεραρχίας των αντικειμένων βρίσκεται το world. Τρεις κανόνες πρέπει να ικανοποιούνται όταν δημιουργούμε ένα καινούργιο αντικείμενο:

Ένα αντικείμενο, έστω A, που βρίσκεται μέσα σε ένα άλλο, έστω B, θα πρέπει να είναι daughter του B.

Ένα daughter αντικείμενο θα πρέπει να περιλαμβάνεται ολόκληρο στο μητρικό αντικείμενο (mother volume).

Τα αντικείμενα δεν θα πρέπει να επικαλύπτονται (overlapping)

Λάθη στην κατασκευή της γεωμετρίας οδηγούν σε λανθασμένη μεταφορά των σωματιδίων εκπομπής και επομένως σε παραπλανητικά αποτελέσματα.

Για την δημιουργία ενός αντικειμένου στο GATE θα πρέπει πρωτίστως να οριστεί το όνομά του καθώς και το όνομα του μητρικού αντικειμένου.

`/gate/mother_Volume_Name/daughters/name Volume_Name`

Αυτή η εντολή προετοιμάζει την δημιουργία ενός νέου αντικειμένου με όνομα *Volume_Name* που θα είναι daughter στο αντικείμενο *mother_Volume_Name*.

Κάποια ονόματα απαγορεύεται να χρησιμοποιηθούν καθώς έχουν προκαθορισμένη σημασία από το GATE: scanner, PETscanner, cylindricalPET, SPECTHead, ecat και CPET. Η δημιουργία του νέου αντικειμένου ολοκληρώνεται μόνο μετά την ανάθεση ενός σχήματος στο αντικείμενο. Τότε δημιουργείται το δένδρο

`/gate/Volume_Name/`

και όλες οι εντολές του δένδρου αυτού και των υποδένδρων του μπορούν να εφαρμοστούν στο καινούργιο αντικείμενο.

Στο GATE είναι διαθέσιμα τα ακόλουθα σχήματα αντικειμένων

κύβος (box), σφαίρα (sphere), κύλινδρος (cylinder), κώνος (cone), ελλειψωειδές (ellipsoid), εξάγωνο (hexagon), πολύγωνο (polygon), τραπεζοειδές (extruded trapezoid) και παραλληλεπίπεδο (parallelepiped)

Η εντολή

`/gate/world/daughters/info`

επιστρέφει την λίστα με τα διαθέσιμα από το GATE σχήματα με το ακριβές όνομα με το οποίο πρέπει να εισάγονται στις εντολές του GATE κάθε φορά που θα χρησιμοποιηθούν. Η εντολή ανάθεσης σχήματος σε ένα αντικείμενο έχει την ακόλουθη μορφή

`/gate/daughter_Volume_Name/daughters/insert Volume_shape`

όπου *Volume_shape* είναι το όνομα του σχήματος.

Το *Volume shape* θα πρέπει απαραίτητως να είναι ένα από τα ακόλουθα ονόματα:

box για κύβο, **sphere** για σφαίρα, **cylinder** για κύλινδρο, **cone** για κώνο, **ellipso** για σωληνοειδές με ελλειπτική βάση, **hexagone** για εξάγωνο, **polycone** για πολύγωνο, **trpd** για τραπεζοειδές και τέλος **parallelepiped** για παραλληλεπίπεδο.

Κάθε γραμμή εντολής κάνει ανάθεση σχήματος στο τελευταίο αντικείμενο που έχει ονομαστεί.

Πίνακας 3.1 Εντολές του υποδένδρου γεωμετρίας για διαφορετικά σχήματα

BOX		TRPD	
setXLength	Καθορίζει το μήκος του κύβου κατά μήκος του άξονα X	setX1Length	Καθορίζει το ήμισυ του μήκους του επιπέδου κατά μήκος του άξονα X στην $-dz$ θέση
setYLength	Καθορίζει το μήκος του κύβου κατά μήκος του άξονα Y	setY1Length	Καθορίζει το ήμισυ του μήκους του επιπέδου κατά μήκος του Y άξονα στην $-dz$ θέση
setZLength	Καθορίζει το μήκος του κύβου κατά μήκος του άξονα Z	setX2Length	Καθορίζει το ήμισυ του μήκους του επιπέδου κατά μήκος του X άξονα στην $+dz$ θέση
SPHERE		setY2Length	Καθορίζει το ήμισυ του μήκους του επιπέδου κατά μήκος του Y άξονα στην $+dz$ θέση
setRmin	Καθορίζει την εσωτερική ακτίνα της σφαίρας (0 για δίσκο)	setZLength	Καθορίζει το ήμισυ του μήκους του τραπεζοειδούς κατά μήκος του Z άξονα
setRmax	Καθορίζει την εξωτερική ακτίνα της σφαίρας	setXBoxLength	Καθορίζει το ήμισυ του μήκους του εκτεταμένου κύβου κατά μήκος του X άξονα
setPhiStart	Καθορίζει την αρχική γωνία ϕ	setYBoxLength	Καθορίζει το ήμισυ του μήκους του εκτεταμένου κύβου κατά μήκος του Y άξονα
setDeltaPhi	Καθορίζει το εύρος τιμών της γωνίας ϕ (2π για δίσκο)	setZBoxLength	Καθορίζει το ήμισυ του μήκους του εκτεταμένου κύβου κατά μήκος του Z άξονα
setThetaStart	Καθορίζει την αρχική γωνία θ	setXBoxPos	Καθορίζει την κεντρική θέση X του κύβου
setDeltaTheta	Καθορίζει το εύρος τιμών της γωνίας θ (2π για δίσκο)	setYBoxPos	Καθορίζει την κεντρική θέση Y του κύβου
CYLINDER		setZBoxPos	Καθορίζει την κεντρική θέση Z του κύβου
setRmin	Καθορίζει την εσωτερική ακτίνα του κυλίνδρου (0 για γεμάτο κύλινδρο)	PARALLELEPIPED	
setRmax	Καθορίζει την εξωτερική ακτίνα του κυλίνδρου	setDx	Καθορίζει την διάσταση Dx του παραλληλεπίπεδου
setHeight	Καθορίζει το ύψος του κυλίνδρου	setDy	Καθορίζει την διάσταση Dy του παραλληλεπίπεδου
setPhiStart	Καθορίζει την αρχική γωνία ϕ	setDz	Καθορίζει την διάσταση Dz του παραλληλεπίπεδου
setDeltaPhi	Καθορίζει το εύρος τιμών της γωνίας ϕ (2π για γεμάτο κύλινδρο)	setAlpha	Καθορίζει την γωνία α
CONE		setTheta	Καθορίζει την γωνία θ
setRmin1	Καθορίζει την εσωτερική ακτίνα της μιας πλευράς του κώνου (0 για γεμάτο κώνο)	setPhi	Καθορίζει την γωνία ϕ
setRmax1	Καθορίζει την εξωτερική ακτίνα της μιας πλευράς του κώνου	POLYCONE	
setRmin2	Καθορίζει την εσωτερική ακτίνα της μιας πλευράς του κώνου (0 για γεμάτο κώνο)	setProfile	Καθορίζει τα διανύσματα θέσης z, rInner, rOuter

setRmax2	Καθορίζει την εξωτερική ακτίνα της μιας πλευράς του κώνου	setPhiStart	Καθορίζει την αρχική γωνία ϕ
setHeight	Καθορίζει το ύψος του κώνου	setDeltaPhi	Καθορίζει το εύρος τιμών της γωνίας ϕ (0 για γεμάτο κώνο)
setPhiStart	Καθορίζει την αρχική γωνία ϕ	HEXAGONE	
setDeltaPhi	Καθορίζει το εύρος τιμών της γωνίας ϕ (0 για γεμάτο κώνο)	setRadius	Καθορίζει την ακτίνα του εξαγώνου
ELLIPSO		setHeight	Καθορίζει το ύψος του εξαγώνου
setLong	Καθορίζει το μήκος του μεγάλου άξονα της έλλειψης		
setShort	Καθορίζει το μήκος του μεγάλου άξονα της έλλειψης		
setHeight	Καθορίζει το ύψος της έλλειψης		

Ορισμός διαστάσεων αντικειμένων

Μετά την δημιουργία ενός αντικειμένου με συγκεκριμένο σχήμα, ανατίθενται από το GATE προκαθορισμένες διαστάσεις οι οποίες σχετίζονται με το αντίστοιχο σχήμα. Οι διαστάσεις αυτές μπορούν να τροποποιηθούν χρησιμοποιώντας το υποδέντρο εντολών

/geometry/

Οι εντολές που είναι διαθέσιμες σε αυτό το υποδέντρο εξαρτώνται από το αντίστοιχο σχήμα. Οι διαφορετικές εντολές που αντιστοιχούν σε κάθε σχήμα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1 και μπορούν να βρεθούν στον κατάλογο

/gate/Volume_Name/geometry

Οι διαστάσεις X, Y, Z ενός αντικειμένου με το όνομα Phantom και σχήμα κύβου μπορούν να οριστούν με τις παρακάτω γραμμές εντολών

```
/gate/Phantom/geometry/setXLength 20. cm
/gate/Phantom/geometry/setYLength 20. cm
/gate/Phantom/geometry/setZLength 88. cm
```

Οι διαστάσεις του Phantom είναι 20 cm, 20 cm και 88 cm για τις διαστάσεις X, Y και Z αντίστοιχα.

Ορισμός του υλικού

Ένα υλικό κατασκευής θα πρέπει να σχετίζεται με κάθε αντικείμενο της προσομοίωσης. Το προκαθορισμένο υλικό που ανατίθεται σε κάθε νέο αντικείμενο είναι ο αέρας (Air). Η λίστα με όλα τα διαθέσιμα υλικά ορίζεται στο αρχείο βάσης δεδομένων GateMaterials.db. Έτσι η επόμενη εντολή «γεμίζει» το αντικείμενο *Volume_Name* με ένα υλικό που ονομάζεται *Material*.

/gate/Volume_Name/setMaterial Material

Στο προηγούμενο παράδειγμα μπορούμε τώρα να ορίσουμε και το υλικό του Phantom με την επόμενη εντολή:

/gate/Phantom/setMaterial Water

Το Phantom αποτελείται τώρα από νερό

Ορισμός χρώματος ή/και εμφάνισης αντικειμένου

Πίνακας 3.2 : Κατάλογος εντολών του υποδένδρου οπτικοποίησης

Εντολή	Λειτουργία	Όρισμα
setColor	Επιλέγει το χρώμα για το τρέχον αντικείμενο	white, gray, black, red,
		green, blue, cyan,
		magenta and yellow
setVisible	Εμφανίζει ή αποκρύπτει το τρέχον αντικείμενο	
setDaughtersInvisible	Εμφανίζει ή αποκρύπτει τα daughters του τρέχοντος αντικειμένου	
setLineStyle	Καθορίζει το στυλ γραμμής του τρέχοντος αντικειμένου	dashed, dotted
		and unbroken
setLineWidth	Καθορίζει το πάχος γραμμής του τρέχοντος αντικειμένου	
forceSolid	Επιβάλλει συμπαγής απεικόνιση του τρέχοντος αντικειμένου	
forceWireframe	Επιβάλλει απεικόνιση πλέγματος του τρέχοντος αντικειμένου	

Για ευκολία οπτικοποίησης της γεωμετρίας μπορούμε να κάνουμε κάποιες επιλογές εμφάνισης των αντικειμένων μας με χρήση του υποδένδρου εντολών vis/.

Οι εντολές που είναι διαθέσιμες σε αυτό το υποδένδρο είναι οι ακόλουθες:

setColor, setVisible, setDaughtersInvisible, setLineStyle, setLineWidth, forceSolid and forceWireframe.

Η λειτουργία τους παρουσιάζεται συνοπτικά στον πίνακα 3.2

Ενεργοποίηση και απενεργοποίηση αντικειμένου

Ένα αντικείμενο μετά την δημιουργία του δεν μπορεί να καταστραφεί στο GATE. Η μοναδική δυνατή ενέργεια είναι η απενεργοποίηση του. Με την εφαρμογή της εντολής disable αντικείμενο εξαφανίζεται από το παράθυρο οπτικοποίησης όχι όμως και από την γεωμετρία. Το αντικείμενο world δεν μπορεί να απενεργοποιηθεί.

Για να απενεργοποιήσουμε ένα αντικείμενο χρησιμοποιούμε την εντολή

/gate/Volume_Name/disable

Το αντικείμενο Volume_Name μπορεί να ενεργοποιηθεί και πάλι με χρήση της εντολής

/gate/Volume_Name/enable

3.5.3 Περιγραφή αντικειμένου

Η λειτουργία της περιγραφής ενός αντικειμένου είναι ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς δίνει στον χρήστη την δυνατότητα να δει τις τιμές όλων των παραπάνω παραμέτρων που περιγράφουν το αντικείμενο με μια μόνο εντολή.

```
/gate/Volume_Name/describe
```

3.5.4 Αναπαραγωγή αντικειμένου

Για την δημιουργία N ταυτόσημων αντικειμένων στο GATE δεν είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν N διαφορετικά αντικείμενα. Μόνο ένα αντικείμενο μπορεί να δημιουργηθεί και στην συνέχεια να αναπαραχθεί σε πολλά αντίγραφα τα οποία θα επαναλαμβάνονται στην γεωμετρία της προσομοίωσης με ένα συγκεκριμένο τρόπο. Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τρόποι να αναπαράγεις και να επαναλάβεις ένα αντικείμενο στην γεωμετρία του GATE. Η γραμμική επανάληψη (linear repeaters), η δακτυλιοειδής επανάληψη (ring repeaters), η επανάληψη κυβικού πίνακα (cubic array repeaters) και η κβαντική επανάληψη (quadrant repeaters).

Για την εμφάνιση των τρόπων επανάληψης (repeaters) που μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα αντικείμενο χρησιμοποιείται η εντολή

```
/gate/Name_Volume/repeaters/info
```

Γραμμική μέθοδος επανάληψης (Linear Repeater)

Η γραμμική μέθοδος επανάληψης είναι κατάλληλη εάν θέλουμε να αναπαραγάγουμε ένα αντικείμενο κατά μήκος μιας κατεύθυνσης (X,Y,Z άξονες ή οποιοδήποτε συνδυασμό τους). Για να χρησιμοποιήσουμε τον linear repeater πρέπει πρώτα να τον επιλέξουμε με την επόμενη εντολή

```
/gate/Name_Volume/repeaters/insert linear
```

Ακολούθως ορίζουμε το πλήθος N των απαιτούμενων επαναλήψεων του αντικειμένου *Volume_Name*.

```
/gate/Name_Volume/linear/setRepeatNumber N
```

Τέλος καθορίζουμε το βήμα και την κατεύθυνση της γραμμικής επανάληψης

```
/gate/Name_Volume/linear/setRepeatVector 0. 0. dZ. mm
```

Έτσι ορίζουμε ένα βήμα dZ mm κατά μήκος της διεύθυνσης Z. Η εντολή "autoCenter" επιτρέπει στον χρήστη να καθορίσει την ξέση των αναπαραγόμενων αντικειμένων.

```
/gate/Name_Volume/linear/autoCenter true or false
```

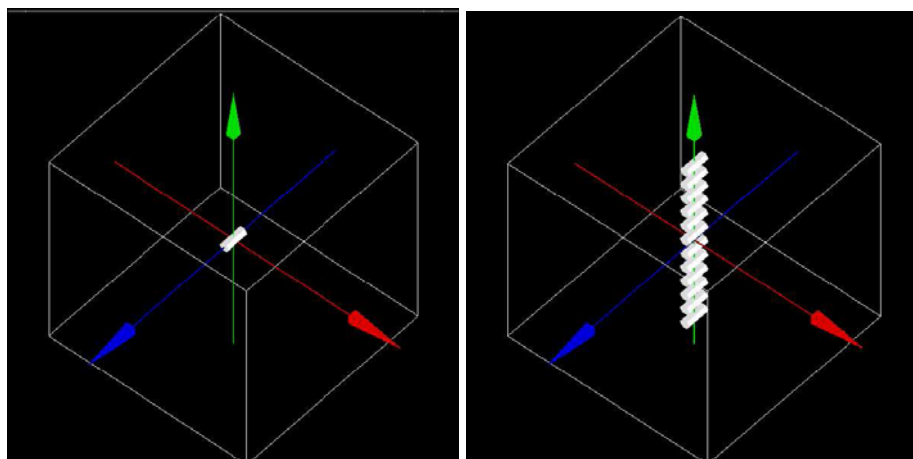
Η επιλογή "true", που είναι και η προκαθορισμένη, ενεργοποιεί το "autoCenter" με αποτέλεσμα το κεντράρισμα της ομάδας των αναπαραγόμενων αντικειμένων γύρω από την θέση του αρχικού αντικειμένου που αναπαράχθηκε.

Η επιλογή "false" κεντράρει το πρώτο αντίγραφο γύρω από την θέση του αρχικού αντικειμένου που αναπαράχθηκε. Τα υπόλοιπα αντίγραφα δημιουργούνται με απλή μετατόπιση.

Παράδειγμα

```
/gate/hole/repeaters/insert linear  
/gate/hole/linear/setRepeatNumber 12  
/gate/hole/linear/setRepeatVector 0. 4. 0. cm
```

Το αντικείμενο hole επαναλαμβάνεται 12 φορές κάθε 4cm κατά μήκος του άξονα Y. Η εφαρμογή του παραπάνω γραμμικού repeater παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2



Εικόνα 3.2 : Παρουσίαση εφαρμογής ενός linear repeater

Δακτυλιοειδής μέθοδος επανάληψης (Ring Repeater)

Η δακτυλιοειδής επανάληψη δίνει την δυνατότητα επανάληψης ενός αντικειμένου κατά μήκος ενός δακτυλίου. Στην τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων οι ανιχνευτές είναι οργανωμένοι γεωμετρικά σε δακτυλίους, επομένως ένας τέτοιος repeater είναι πολύ χρήσιμος και αναγκαίος σε προσομοιώσεις PET.

Για την επιλογή του ring repeater χρησιμοποιούμε την εντολή:

```
/gate/Name_Volume/repeaters/insert ring
```

Ο ορισμός του αριθμού των επαναλήψεων του αναπαραγόμενου αντικειμένου πραγματοποιείται με την εντολή

```
/gate/Name_Volume/ring/setRepeatNumber N
```

Τέλος ο άξονας γύρω από τον οποίο το αντικείμενο *Volume_Name* θα αναπαραχθεί, ορίζεται από τις συντεταγμένες δύο σημείων στο χώρο

```
/gate/Name_Volume/ring/setPoint1 0. 1. 0. mm  
/gate/Name_Volume/ring/setPoint2 0. 0. 0. mm
```

Ο προκαθορισμένος άξονας περιστροφής είναι ο Z. Εάν, λοιπόν παραλείψουμε την τελευταία εντολή τότε η επανάληψη θα γίνει κατά μήκος ενός δακτυλίου με άξονα περιστροφής τον Z. Επίσης η προκαθορισμένη φορά επανάληψης είναι η αντίθετη από εκείνη των δεικτών του ρολογιού.

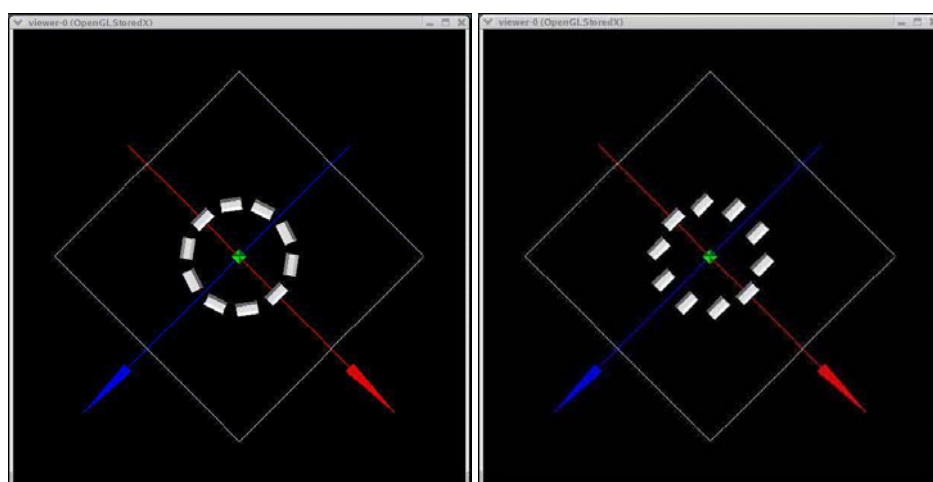
Για τις περισσότερες εφαρμογές όπου απαιτείται απλά αναπαραγωγή ενός αντικειμένου κατά μήκος ενός δακτυλίου σε γωνιακό μήκος 360 μοιρών οι προηγούμενες τρεις εντολές είναι αρκετές. Όμως η διαδικασία της δακτυλιοειδούς επανάληψης μπορεί να ρυθμιστεί ακόμα περισσότερο χρησιμοποιώντας ορισμένες από τις επόμενες εντολές

```
/gate/Name_Volume/ring/setFirstAngle x deg
/gate/Name_Volume/ring/setAngularSpan x deg
```

Με την πρώτη εντολή ρυθμίζεται η γωνία περιστροφής του πρώτου αντιγράφου (προκαθορισμένη τιμή ίση με 0 μοίρες) ενώ με την δεύτερη η διαφορά γωνιών περιστροφής ανάμεσα στο πρώτο και στο τελευταίο αντίγραφο (προκαθορισμένη τιμή 360 μοίρες). Η διαφορά αυτή ονομάζεται και εύρος τιμών γωνιών ή γωνιακό εύρος (angular span).

Το γωνιακό εύρος, γωνία περιστροφής του πρώτου αντιγράφου και ο αριθμός των επαναλήψεων μας δίνουν την δυνατότητα να υπολογίσουμε την διαφορά γωνιών περιστροφής μεταξύ δυο οποιονδήποτε γειτονικών αντιγράφων (angular pitch), σύμφωνα με την παρακάτω σχέση

$$\frac{\text{AngularSpan-FirstAngle}}{\text{RepeatNumber-1}} = \text{AngularPitch}$$



Εικόνα 3.2: Παρουσίαση της εφαρμογής του ring repeater όταν η επιλογή του auto-rotation είναι ενεργοποιημένη (αριστερά) και απενεργοποιημένη (δεξιά)

Όταν η επιλογή auto-rotation είναι ενεργοποιημένη για κάποιο αντικείμενο τότε το αντικείμενο αυτό έχει την δυνατότητα να περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του κατά την εφαρμογή του ring repeater έτσι ώστε ο άξονας του να εφάπτεται με τον δακτύλιο (εικόνα 3.3). Εάν όμως αυτή η επιλογή είναι απενεργοποιημένη, τότε όλα τα αναπαραγόμενα αντίγραφα διατηρούν τον προσανατολισμό του αρχικού αντικειμένου (εικόνα 3.4). Οι εντολές για ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της επιλογής του auto-rotation είναι οι ακόλουθες

```
/gate/Name_Volume/ring/enableAutoRotation
/gate/Name_Volume/ring/disableAutoRotation
```

Μέθοδος επανάληψης κυβικού πίνακα (cubic array repeater)

Ο cubic array repeater είναι κατάλληλος για να αναπαράγει ένα αντικείμενο κατά μήκος ενός, δύο ή τριών αξόνων. Έχει εφαρμογή στην κατασκευή ενός collimator για προσομοιώσεις SPECT.

Για να επιλέξουμε έναν cubic array repeater χρησιμοποιούμε την εντολή

```
/gate/Name_Volume/repeaters/insert cubicArray
```

Για να ορίσουμε τον αριθμό των επαναλήψεων N_x , N_y και N_z του αντικειμένου $Volume_Name$ κατά μήκος των αξόνων X,Y και Z αντίστοιχα θα έχουμε

```
/gate/hole/cubicArray/setRepeatNumberX Nx  
/gate/hole/cubicArray/setRepeatNumberY Ny  
/gate/hole/cubicArray/setRepeatNumberZ Nz
```

Ο ορισμός των βημάτων επανάληψης σε κάθε διεύθυνση υπολογισμένη σε X mm, Y mm και Z mm αντίστοιχα πραγματοποιείται με την εντολή

```
/gate/hole/cubicArray/setRepeatVector X Y Z mm
```

3.5.5 Τοποθέτηση αντικειμένου στο χώρο

Η τοποθέτηση του αντικειμένου στο χώρο ορίζεται με χρήση του υποδένδρου εντολών

```
/placement/
```

Υπάρχουν τρεις τρόποι μετατόπισης και τοποθέτησης του αντικειμένου σε ένα σημείο του χώρου: **μετατόπιση (translation)**, **περιστροφή (rotation)** και **ευθυγράμμιση (alignment)**.

Μετατόπιση (Translation)

Η μετατόπιση του αντικειμένου *Name_Volume* κατά μήκος της X διεύθυνσης κατά x cm γίνεται με την εντολή

```
/gate/Name_Volume/placement/setTranslation x. 0. 0. cm
```

Η θέση ενός αντικειμένου στο GATE δίνεται πάντα ως προς το κέντρο του αντίστοιχου μητρικού αντικειμένου.

Εάν χρειάζεται να προσδιοριστεί η γωνία ϕ (XY επίπεδο) του διανύσματος μετατόπισης τότε χρησιμοποιούμε την εντολή

```
/gate/Name_Volume/placement/setPhiOfTranslation N deg
```

Αντιστοίχως για τον προσδιορισμό της γωνίας θ (ως προς τον άξονα Z)

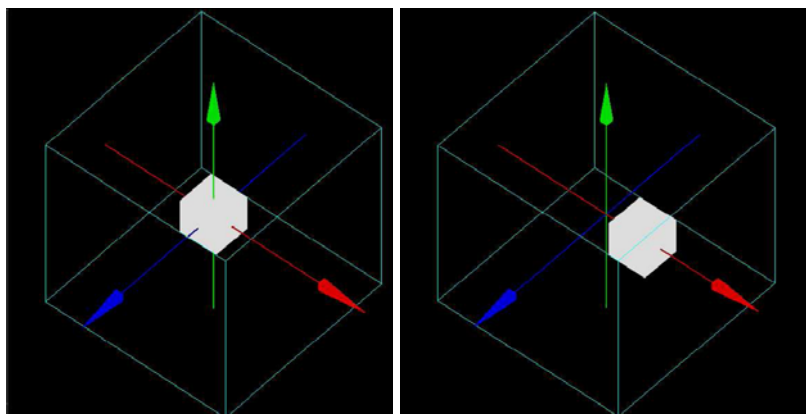
```
/gate/Name_Volume/placement/setThetaOfTranslation N deg
```

Τέλος μπορούμε να προσδιορίσουμε και το πλάτος του διανύσματος μετατόπισης

```
/gate/Name_Volume/placement/setMagOfTranslation xx cm
```

Στο ακόλουθο παράδειγμα το αντικείμενο Phantom έχει τοποθετηθεί στο σημείο με συντεταγμένες X,Y,Z 10 cm, 0 cm, 0 cm από το κέντρο του μητρικού αντικειμένου (εδώ του world). Η εφαρμογή αυτής της μετατόπισης παρουσιάζεται στην εικόνα 3.4

```
/gate/Phantom/placement/setTranslation 1. 0. 0. cm  
/gate/Phantom/placement/setMagOfTranslation 10. cm
```

Εικόνα 3.3: Παρουσίαση της εφαρμογής της μετατόπισης

Περιστροφή αντικειμένου

Η περιστροφή του Name_Volume κατά N μοίρες γύρω από τον άξονα X γίνεται με τις εντολές

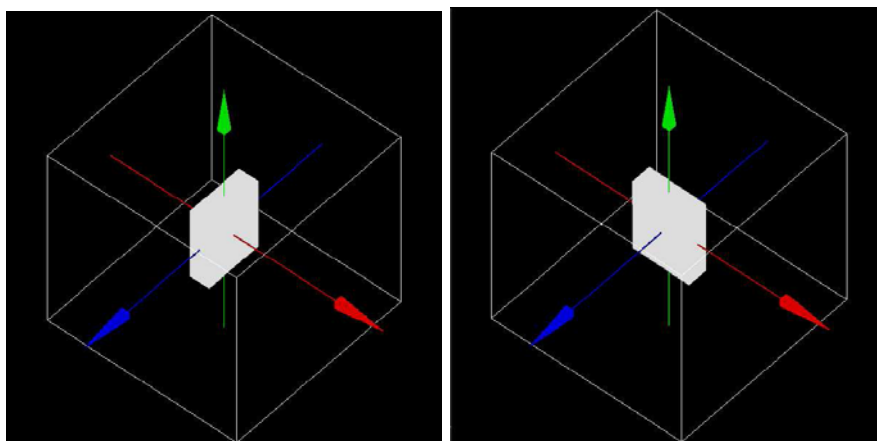
```
/gate/Name_Volume/placement/setRotationAxis X 0 0
/gate/Name_Volume/placement/setRotationAngle N deg
/gate/Name_Volume/placement/setAxis 0 1 0
```

Ο προκαθορισμένος από το GATE άξονας περιστροφής είναι ο Z.

Παράδειγμα

Στο ακόλουθο παράδειγμα περιστρέφουμε το αντικείμενο Phantom κατά 90 μοίρες γύρω από τον άξονα Y. Η εικόνα 3.5 παρουσιάζει της εφαρμογής αυτής της περιστροφής

```
/gate/Phantom/placement/setRotationAxis 0 1 0
/gate/Phantom/placement/setRotationAngle 90 deg
```



Εικόνα 3.4 : Παρουσίαση της εφαρμογής της περιστροφής

Ευθυγράμμιση αντικειμένου (Alignment)

Χρησιμοποιώντας την εντολή ευθυγράμμισης έχουμε την δυνατότητα να ευθυγραμμίσουμε παράλληλα προς έναν από τους τρεις άξονες του συστήματος εκείνα τα αντικείμενα στο GATE που διαθέτουν άξονα συμμετρίας (κυλίνδρους, ελλειψοειδή, κώνους και εξάγωνα).

Η ευθυγράμμιση κατά μήκος του X γίνεται με την εντολή

/gate/Name_Volume/placement/alignToX

3.5.6 Μετακίνηση αντικειμένου (movement)

Η αρχιτεκτονική της γεωμετρίας του Geant4 απαιτεί στατική γεωμετρία κατά την διάρκεια της γεωμετρίας. Όμως η τυπική διάρκεια ενός απλού γεγονότος (ps για μεταφορά σωματιδίων εκπομπής, ns για σπινθηρισμό και ms για την ηλεκτρονική απόκριση του συστήματος) είναι πολύ μικρή σε σχέση με την διάρκεια των περισσότερων γεωμετρικών μεταβολών που μοντελοποιούμε. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε τα γεωμετρικά στοιχεία ακίνητα κατά την διάρκεια μιας χρονοθυρίδας (time step). Ανάμεσα σε κάθε χρονοθυρίδα η θέση και ο προσανατολισμός ενός υποσυνόλου των αντικειμένων daughter μπορεί να μεταβληθεί για να προσομοιώσει μια μετατόπιση ή περιστροφή. Αυτές οι μετακινήσεις μπορούν να παραμετροποιηθούν με την χρήση της ταχύτητας. Δηλαδή το μέτρο της μετακίνησης ενός αντικειμένου μπορεί να προσδιοριστεί από τον πολλαπλασιασμό της διάρκειας μιας χρονοθυρίδας με την ταχύτητα της κίνησης.

Επομένως με δεδομένη την ταχύτητα των στοιχείων της γεωμετρίας (δηλ. των αντικειμένων), αποτελεί ευθύνη του χρήστη να καθορίσει μια κατάλληλη χρονοθυρίδα μικρής διάρκειας έτσι ώστε να προκαλέσει ομαλές μεταβολές κατά την κίνηση. Στο GATE ένα αντικείμενο μπορεί να μετακινηθεί με πέντε τρόπους:

Περисτροφή (rotation), μετατόπιση (translation), περιφορά (orbiting), ταλάντωση (wobbling) και έκκεντρη περιστροφή (eccentric rotation).

3.6 Ορισμός συστήματος

Η έννοια του συστήματος αποτελεί έννοια κλειδί για το GATE. Παρέχει την δομή για μια προκαθορισμένη γεωμετρία προσομοίωσης ενός πραγματικού απεικονιστικού συστήματος. Οικογένειες γεωμετρικών διατάξεων, όπως οι διατάξεις για PET και SPECT, τα μέλη των οποίων μοιράζονται τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά μπορούν να προέλθουν από τέτοιες προκαθορισμένες δομές. Η περιγραφή κάθε συστήματος γίνεται από στοιχεία της γεωμετρίας τα οποία είναι οργανωμένα σε δένδρική δομή έχοντας το καθένα τον δικό του ειδικό ρόλο και τάξη μέσα σε αυτό το δέντρο.

Συγκεκριμένα στο σύστημα cylindricalPET τα γεωμετρικά αντικείμενα που περιέχουν κρυστάλλους ομαδοποιούνται σε πίνακες, οι οποίοι με την σειρά τους συγκεντρώνονται στα αντικείμενα submodules και modules. Στο επίπεδο κορυφής της δένδροειδούς δομής, τα αντικείμενα modules οργανώνονται σε sectors, τα οποία ακολούθως επαναλαμβάνονται με την βοήθεια ενός ring repeater σε κυλινδρική επιφάνεια για την κατασκευή της τελικού συστήματος σάρωσης (scanner system). Επομένως όλοι οι σαρωτές που κατασκευάζονται σύμφωνα με το προκαθορισμένο σύστημα cylindricalPET στο GATE οργανώνονται γεωμετρικά σε ένα δέντρο το οποίο έχει τα ακόλουθα επίπεδα με κατεύθυνση από την ρίζα του προς τα φύλλα του:

"rsector", "module", "submodule", "crystal" και (crystal)"layer"

Στο GATE είναι διαθέσιμα τα ακόλουθα συστήματα:

scanner, SPECTHead, cylindricalPET, ecat και CPET.

3.6.1 Επιλογή συστήματος

Το GATE μπορεί να χρησιμοποιηθεί και χωρίς να ορίσουμε κάποιο προκαθορισμένο σύστημα, αλλά σε αυτή την περίπτωση δεν θα είναι διαθέσιμες οι πληροφορίες σχετικά με την

αλληλεπίδραση των σωματιδίων. Ο λόγος για αυτό είναι πως οι αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό των ανιχνευτικών τμημάτων του σαρωτή (στο εξής θα αναφερόμαστε σε αυτές τις αλληλεπιδράσεις με τον όρο "hits") καταγράφονται στο GATE μόνο για εκείνα τα αντικείμενα που ανήκουν σε ένα προκαθορισμένο σύστημα (τα αντικείμενα αυτά αναφέρονται ως crystalSD όπου SD είναι τα αρχικά του "sensitive detector" δηλαδή του «ευαίσθητου» ανιχνευτή).Επομένως, εάν ο χρήστης επιθυμεί μόνο να ελέγξει την γεωμετρία του συστήματος, η χρήση ενός προκαθορισμένου συστήματος δεν είναι απαραίτητη. Όμως εάν επιπλέον θελήσει να σώσει δεδομένα φυσικής από την διαδρομή των σωματιδίων μέσα στους ανιχνευτές, τότε η γεωμετρία θα πρέπει να συνδεθεί με ένα από τα παραπάνω συστήματα. Στην παράγραφο αυτό περιγράφονται συνοπτικά τα στοιχεία και οι κανόνες μιας τέτοιας σύνδεσης.

3.6.1.1 Περιορισμοί προσομοίωσης γεωμετρίας

- Αρχικά το γεωμετρικό σχήμα των διαφόρων στοιχείων (gantry, sector, bucket κτλ) θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, εκτός εάν επιλέξουμε το γενικό σύστημα scanner, το οποίο δεν απαιτεί κανένα περιορισμό. Επίσης σημαντική είναι και η επιλογή τόσο του σχήματος των κρυσταλλικών ανιχνευτών όσο και του υλικού από το οποίο αποτελούνται (για παράδειγμα σπινθηριστές – scintillators).
- Ακόμη κάθε επίπεδο θα πρέπει να ανατεθεί σε ένα φυσικό αντικείμενο της γεωμετρίας. Ένα αντικείμενο που αντιστοιχεί σε ένα επίπεδο θα πρέπει να περιέχεται πλήρως στο αντικείμενο που αντιστοιχεί στο αμέσως ανώτερο επίπεδο.
- Επιπλέον ο αριθμός των επιπέδων πρέπει να είναι προκαθορισμένος, να μην μεταβάλλεται και να συμμορφώνεται στους κανονισμούς του πίνακα 3.1. Η αρίθμηση των «ευαίσθητων αντικειμένων» καθορίζεται απόλυτα από την επιλογή του συστήματος και πρέπει να είναι σύμφωνη με μια συγκεκριμένη μορφή δεδομένων εξόδου (output format).
- Ο μέγιστος αριθμός γεωμετρικών στοιχείων κάθε επιπέδου εξαρτάται από την μορφή των δεδομένων εξόδου αφού περιορίζεται από τον αριθμό των δεσμευόμενων bit για την αρίθμηση των κρυστάλλων.
- Τέλος άλλοι περιορισμοί μπορούν να προκύψουν από την συγκεκριμένη μορφή δεδομένων εξόδου που θα επιλεγεί.

3.6.1.2 Περιορισμοί προσομοίωσης ηλεκτρονικής απόκρισης

Πολλοί παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό της προσομοίωσης της απόκρισης των ηλεκτρονικών καρτών συλλογής δεδομένων (data acquisition electronic cards). Αρχικά όλα τα ηλεκτρονικά στοιχεία επεξεργασίας θα πρέπει να ελεγχθούν έτσι ώστε να οριστούν τα αντίστοιχα στοιχεία της προσομοίωσης. Αυτός ο έλεγχος αφορά όχι μόνο την προσομοίωση απλών καναλιών, όπως ο έλεγχός του κατωφλίου απόκρισης, αλλά επίσης και την παρεμβολή (crosstalk) μεταξύ διαφορετικών καναλιών συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονικών και οπτικών παρεμβολών μεταξύ στοιχείων του ίδιου επιπέδου της γεωμετρίας. Στο GATE υπάρχει η δυνατότητα να εισαχθεί όλη αυτή η επεξεργασία του σήματος στην προσομοίωση με την βοήθεια μονάδων ψηφιοποίησης (**digitizers** - στο εξής θα αναφερόμαστε στις μονάδες αυτές με αυτόν τον όρο). Στόχος λοιπόν των digitizers στο GATE είναι η μοντελοποίηση της ηλεκτρονικής απόκρισης ενός απεικονιστικού συστήματος τομογραφίας εκπομπής. Βασίζονται στην ιδέα ιεράρχησης επιπέδων του συστήματος που περιγράψαμε παραπάνω. Για να προσδιοριστεί το επίπεδο μέσα στο σύστημα χρησιμοποιείται η μεταβλητή "**depth value**", οι τιμές της οποίας αντιστοιχούν κάθε φορά και σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ανάλογα με το σύστημα που έχει επιλεγεί, όπως φαίνεται και

στον πίνακα 3.4 . Η depth value χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει μια ομάδα από όμοια γεωμετρικά στοιχεία τα οποία ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, το οποίο στη περίπτωση του cylindricalPET συστήματος μπορεί να είναι το μπλοκ των κρυστάλλων (επίπεδο crystal, depth=1), η μήτρα των κρυσταλλικών block(επίπεδο module ή submodule) μια ομάδα μήτρων (επίπεδο rsector, depth=1). Με τον προσδιορισμό της τιμής depth πετυχαίνουμε την τμηματοποίηση της επεξεργασίας των δεδομένων επεξεργασίας (readout segmentation) αφού μπορούμε να επιλέξουμε είτε την ανάλυση του σήματος κάθε ανιχνευτή ξεχωριστά είτε την ομαδοποίηση των σημάτων που προέρχονται από ένα σύνολο ανιχνευτών (για παράδειγμα από ένα block κρυστάλλων-ανιχνευτών). Επομένως για την προσομοίωση της ηλεκτρονικής απόκρισης σε σχέση με ένα σύστημα θα πρέπει να θεωρήσουμε την ακόλουθη διαδικασία:

- Ομαδοποιούμε τα ηλεκτρονικά στοιχεία του ανιχνευτή σε επίπεδα
- Σχεδιάζουμε την λίστα των μονάδων επεξεργασίας σήματος που θα χρησιμοποιήσουμε στα ομαδοποιημένα σήματα
- Συνδυάζουμε τα σήματα που έρχονται από διαφορετικά αντικείμενα με την χρήση για παράδειγμα των μονάδων readout (για την άθροιση σημάτων από ένα αντικείμενο) και της παραμέτρου crosstalk.

3.6.2 Σύνδεση γεωμετρικών στοιχείων με ένα σύστημα

Η σύνδεση της γεωμετρίας με ένα σύστημα λαμβάνει χώρα σε πολλά επίπεδα.

- Αρχικά θα πρέπει να οριστεί η γεωμετρική διάταξη, λαμβάνοντας υπόψη ότι θα πρέπει να ικανοποιεί κάποιους περιορισμούς όπως περιγράψαμε παραπάνω.
- Στην συνέχεια θα πρέπει να εισαχθεί ή να συνδεθεί (attach) το σύστημα της γεωμετρίας με την διαδικασία της προσομοίωσης χρησιμοποιώντας την εντολή **"attach"**. Το όρισμα της εντολής θα είναι μια λέξη-κλειδί που θα αντιστοιχεί στο όνομα ενός επιπέδου της γεωμετρικής διάταξης. Στην γενική περίπτωση η μακροεντολή θα έχει την μορφή

`/gate/systems/SystemName/Level/attach UserVolumeName`

Όπου

SystemName	Είναι το δεσμευμένο όνομα του συστήματος (στήλη 1 στους επόμενους πίνακες)
Level	Είναι το δεσμευμένο όνομα του επιπέδου της γεωμετρίας (στήλη 2)
UserVolumeName	Είναι το όνομα που ο χρήστης επέλεξε να δώσει στο αντικείμενο σύμφωνα με τις συμβάσεις που υπάρχουν στο GATE.

- Τέλος πρέπει να οριστεί ποια μορφή (format) από τις διαθέσιμες για κάθε σύστημα θα έχουν τα δεδομένα εξόδου σε περίπτωση που απαιτείται επεξεργασία και ανάλυση τους.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε την προσομοίωση ενός συστήματος τομογραφίας εκπομπής ποζιτρονίων τύπου **ecat**. Έτσι θα έχουμε την δυνατότητα να δούμε ένα ολοκληρωμένο παράδειγμα προσομοίωσης στο GATE για να διαπιστώσουμε και την ακρίβεια και ευκολία της μοντελοποίησης που μας προσφέρει το συγκεκριμένο πακέτο λογισμικού. Τότε θα αναφερθούμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις παραμέτρους ενός προκαθορισμένου συστήματος του GATE και συγκεκριμένα του συστήματος ecat το οποίο έχει σχεδιαστεί για την οικογένεια των ecat scanners της εταιρείας CPS Innovations (Knoxville, TN, USA).

Πίνακας 3.3 : Τα διαθέσιμα συστήματα στο GATE και τα χαρακτηριστικά τους. Στην δεύτερη στήλη περιέχονται ορισμένες λέξεις-κλειδιά που επίσης χρησιμοποιούνται ως ορίσματα στις μακροεντολές. Τα σχήματα στην τρίτη στήλη περιγράφουν το μητρικό αντικείμενο, το οποίο αποτελείται από “daughter” αντικείμενα: το σχήμα *box* αναφέρεται σε ένα κυβικό μητρικό αντικείμενο το οποίο περιέχει ένα σύνολο από “daughter” αντικείμενα ταξινομημένα σε μορφή πίνακα. Οι κύλινδροι αναφέρονται σε σωληνοειδή αντικείμενα με εσωτερική και εξωτερική ακτίνα.

Σύστημα	Επίπεδο γεωμετρικού αντικειμένου και σχήμα		Διαθέσιμοι τύποι (formats) για δεδομένα εξόδου
scanner	level1	αυθαίρετη επιλογή	Βασικοί τύποι εξόδου : Ascii ή ROOT, <i>coincidences</i> ορίζονται μόνο για τον <i>PETscanner</i>
	level2		
	level3		
	level4		
	level5		
cylindricalPET	rsector	box	Βασικοί τύποι εξόδου : Ascii ή ROOT. Ειδικοί τύποι εξόδου : <i>LMF</i>
	module	Box	
	submodule	Box	
	crystal	Box	
	layer	Box	
CPET	crystal	cylinder	Βασικοί τύποι εξόδου: Ascii ή ROOT
SPECTHead		Αυθαίρετη επιλογή	Βασικοί τύποι εξόδου: Ascii και ROOT Ειδικοί τύποι εξόδου: <i>PROJECTIONSET</i> ή <i>INTERFILE</i> , όχι <i>coincidences</i>
	crystal		
	pixel		
ecat			Βασικοί τύποι εξόδου: Ascii και ROOT Ειδικοί τύποι εξόδου: <i>SINOGRAM</i> or <i>ECAT7</i>
	block	block	
	crystal	crystal	

Πίνακας 3.4 : όροι που αντιστοιχούν στο επίπεδο του δένδρου που προσδιορίζει γεωμετρικά κάθε σύστημα και οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν ως ορίσματα στην εντολή *attach*. Τουλάχιστον ένα επίπεδο θα πρέπει να συνδεθεί (*attached*) στο αντίστοιχο σύστημα. Εάν είναι απαραίτητο τα συγκεκριμένα ονόματα επιπέδων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένο εισόδου στις μονάδες των *digitizers*: για παράδειγμα έτσι μπορούν να μοντελοποιηθούν διαφορετικά ηλεκτρονικά *dead time* για κάθε επίπεδο του συστήματος. Οι δύο τελευταίες γραμμές του πίνακα αναφέρονται μόνο στα αντικείμενα (*“sensitive” volumes*) στα οποία το *GATE* ανιχνεύει συμβάντα

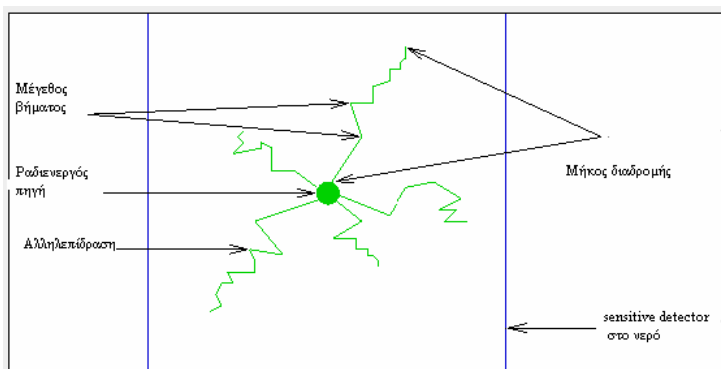
Σύστημα	Όρισμα της εντολής <i>attach</i>	Depth για τμηματοποίηση της επεξεργασίας των δεδομένων εξόδου (readout segmentation)
scanner	<code>``level1"</code>	1
	<code>"level2"</code>	2
	<code>"level3"</code>	3
	<code>"level4"</code>	4
	<code>"level5"</code>	5
cylindricalPET	<code>``rsector"</code>	1
	<code>``module"</code>	2
	<code>``submodule"</code>	3
	<code>``crystal"</code>	4
	<code>``layer[i], i=0,3^α"</code>	5
CPET	<code>``crystal"</code>	1
SPECTHead		
	<code>``crystal"</code>	1
	<code>``pixel"</code>	2
ecat		
	<code>``block"</code>	1

Σύνδεση (attachment) ειδικών αντικειμένων

όλα τα συστήματα	Ευαίσθητο αντικείμενο-ανιχνευτής	<code>“attachCrystalSD”</code>
όλα τα συστήματα	Ευαίσθητο αντικείμενο-phantom	<code>“attachPhantomSD”</code>

3.7 Σύνδεση sensitive detector

Αφού έχει οριστεί ένα μοντέλο για τον scanner που θέλουμε να προσομοιώσουμε μέσω της κατασκευής ενός συστήματος, το επόμενο βήμα είναι η σύνδεση (attachment) ενός «ευαίσθητου ανιχνευτή» ("sensitive detector" –SD) σε μερικά αντικείμενα της γεωμετρίας. Όπως σε κάθε προσομοίωση Geant4, αυτοί οι sensitive detectors χρησιμοποιούνται για να αποθηκεύσουν πληροφορία σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις ενός σωματιδίου με την ύλη (hits) χρησιμοποιώντας πληροφορία από διάφορα βήματα κατά μήκος της διαδρομής του σωματιδίου. Ένα hit είναι ένα στιγμιότυπο μιας φυσικής αλληλεπίδρασης μιας διαδρομής ενός σωματιδίου στην ευαίσθητη περιοχή ενός ανιχνευτή. Στην εικόνα 3.6 παρουσιάζονται αυτές οι έννοιες.



Εικόνα 3.5: Αλληλεπίδραση σωματιδίων με την ύλη

Τα hits αποθηκεύουν διάφορες πληροφορίες όπως: βηματική ενεργειακή κατάθεση, γεωμετρική πληροφορία θέση και χρονική στιγμή βήματος, κτλ.

Είναι απαραίτητο να θυμόμαστε ότι το GATE καταγράφει και αποθηκεύει πληροφορία σχετικά με τα hits μόνο για εκείνα τα αντικείμενα τα οποία έχουν συνδεθεί σε έναν sensitive detector. Όλη η πληροφορία σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν σε μη-ευαίσθητα αντικείμενα χάνεται.

Στο GATE ορίζονται δύο είδη sensitive detector:

- Ο crystalSD επιτρέπει την καταγραφή πληροφορίας σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις στο εσωτερικό των αντικειμένων που ανήκουν σε ένα απεικονιστικό σύστημα για παράδειγμα των κρυστάλλων ή collimator.
- Ο phantomSD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καταγραφή πληροφορίας σχετικά με αλληλεπιδράσεις Compton και Rayleigh που λαμβάνουν χώρα στα αντικείμενα πριν την ανιχνευτική διάταξη του συστήματος (για παράδειγμα στην περίπτωση μιας SPECT κάμερας: το τραπέζι της εξέτασης, το phantom και ο collimator είναι μερικά από τα αντικείμενα από τα οποία θα ήταν σημαντικό να συλλέξουμε πληροφορία σχετικά με αλληλεπιδράσεις Compton και Rayleigh.

Μια ολοκληρωμένη προσομοίωση συνήθως περιλαμβάνει την εκτέλεση και των δύο ειδών συνδέσεων: μια σειρά από αντικείμενα συνδέονται στο phantomSD και μια άλλη σειρά στο crystalSD.

3.7.1 Σύνδεση του crystalSD

Ο crystalSD μπορεί να συνδεθεί μόνο σε εκείνα τα αντικείμενα που ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο σύστημα. Μόλις ο crystalSD συνδεθεί, θεωρείται ότι έχει συνδεθεί σε αυτό το σύστημα.

Αυτός ο sensitive detector μπορεί να συνδεθεί σε ένα αντικείμενο με την εντολή **attachCrystalSD**. Τα αντικείμενα με τα οποία προοριζόταν αρχικά να συνδεθεί ήταν σπινθηριστές (κρύσταλλοι) αλλά μπορεί επίσης να συνδεθεί και σε αντικείμενα που δεν έχουν ιδιότητες σπινθηρισμού (non-scintillating) όπως collimators, shields και septa.

Ακολουθεί ένα παράδειγμα των γραμμών εντολών που θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται σε ένα macro αρχείο που χρησιμοποιεί τον crystalSD. Οι παρακάτω εντολές πρέπει να εισαχθούν μετά την περιγραφή των συνδέσεων του συστήματος:

Η πρώτη εντολή χρησιμοποιείται για την σύνδεση του κρυστάλλου-ανιχνευτή στο επίπεδο “crystal” του συστήματος SPECTHead.

```
# A T T A C H      S Y S T E M  
/gate/systems/SPECThead/crystal/attach crystal
```

Μετά η δεύτερη εντολή συνδέει το crystalSD στο αντικείμενο που αντιπροσωπεύει τον κρύσταλλο-ανιχνευτή στην γεωμετρία της προσομοίωσης.

```
# A T T A C H      S E N S I T I V E   D E T E C T O R  
/gate/crystal/attachCrystalSD
```

3.7.2 Σύνδεση του phantomSD

Ο phantomSD διαδραματίζει ένα κρίσιμο ρόλο στο GATE καθώς χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και μέτρηση των αλληλεπιδράσεων Compton και Rayleigh που λαμβάνουν χώρα μέσα στο πεδίο οράσεως (field of view – FOV) του scanner. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται μετά για να εκτιμηθεί εάν ένα φωτόνιο που προσπίπτει σε έναν ανιχνευτή έφτασε άμεσα σε αυτόν ή εάν προήλθε μετά από σκέδαση Compton. Έτσι, στο PET, ο phantomSD είναι αυτή τη στιγμή ο μόνος τρόπος για την διάκριση των σκεδαζόμενων συμβάντων (scattered events) από τα συμβάντα σύμπτωσης (coincidence events) που είναι και εκείνα που δίνουν την χρήσιμη πληροφορία. Για την προσομοίωση πειραμάτων ακτίνων Χ χαμηλής ενέργειας πληροφορία σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις Rayleigh είναι πολύ σημαντικές.

Χρησιμοποιώντας αυτό το είδος sensitive detector μπορούν να αποκτηθούν δύο είδη πληροφορίας που αφορούν τα hits.

- Ο αριθμός των αλληλεπιδράσεων Compton και Rayleigh που συμβαίνουν σε όλα τα αντικείμενα που είναι συνδεδεμένα στον phantomSD. Αυτή η πληροφορία αποθηκεύεται στις μεταβλητές δεδομένων εξόδου: **nPhantomCompton** και **nPhantomRayleigh**. Βέβαια η πληροφορία αυτή είναι διαθέσιμη και για τον crystalSD από τις μεταβλητές: **nCrystalCompton** και **NCrystalRayleigh**.

Η διαδικασία που ακολουθούμε για την σύνδεση του phantomSD αποτελείται από τα παρακάτω βήματα

- Πρώτα πρέπει να ορίσουμε ένα αντικείμενο γεμάτο από αέρα το οποίο θα καλύπτει όλο το πεδίο οράσεως του σαρωτή.
- Στη συνέχεια όλα τα αντικείμενα-πηγές θα πρέπει να είναι απόγονοι (άμεσα ή έμμεσα) αυτού του αντικειμένου
- Τέλος όλα αυτά τα αντικείμενα πρέπει να συνδεθούν στο phantomSD με χρήση της εντολής **attachPhantomSD**.

3.8 Φυσικές διεργασίες

3.8.1 Μοντέλο φυσικών διεργασιών

Το GATE χρησιμοποιεί τις φυσικές διεργασίες του Geant4. Στο Geant4 είναι διαθέσιμα δύο είδη πακέτων για την προσομοίωση των ηλεκτρομαγνητικών διεργασιών:

- Standard Energy Electromagnetic Processes (SEP)
- Low Energy Electromagnetic Processes (LEP)

Με το SEP μπορούν να προσομοιωθούν αλληλεπιδράσεις φωτοηλεκτρικής και Compton διάχυσης με ενέργεια υψηλότερη από 10keV. Όσον αφορά τα πακέτα LEP, το εγχειρίδιο φυσικής του Geant4 παρέχει κάποια σχόλια και λεπτομέρειες.

Οι διεργασίες χαμηλής ενέργειας του Geant4 αντιπροσωπεύουν ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις σε χαμηλότερες ενέργειες από αυτές που καλύπτονται από τις αντίστοιχες SEP του Geant4. Η τρέχουσα υλοποίηση των διεργασιών χαμηλής ενέργειας ισχύει για τιμές ενέργειας τουλάχιστον 250eV (και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενέργειες έως 100GeV) εκτός αν διευκρινίζεται διαφορετικά. Καλύπτει αντικείμενα με ατομικό αριθμό μεταξύ 1 και 99.

3.8.2 Αλλαγή φυσικής διεργασίας

Οι φυσικές διαδικασίες που αφορούν μεταφορά ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων δεν μπορούν να μεταβληθούν (hard coded). Ο χρήστης όμως μπορεί να ορίσει την λίστα διεργασιών φωτονίων και για κάθε διεργασία, έχει την δυνατότητα να επιλέξει το συγκεκριμένο ενεργειακό μοντέλο με τις ακόλουθες εντολές

- **standard** : Χρήση του ενεργειακού μοντέλου SEP
- **lowenergy** : Χρήση του ενεργειακού μοντέλου LEP
- **inactive** : Επιλογή να μην προσομοιωθεί η αλληλεπίδραση

Ακολουθεί ένα παράδειγμα για τον ορισμό μιας πλήρους λίστας διεργασιών φωτονίου

```
/gate/physics/gamma/selectPhotoelectric lowenergy  
/gate/physics/gamma/selectCompton standard  
/gate/physics/gamma/selectRayleigh inactive
```

3.8.3 Αρχικοποίηση της γεωμετρίας και των φυσικών διεργασιών

Γιατί αρχικοποίηση;

Η αρχικοποίηση πρέπει να πραγματοποιηθεί μετά την περιγραφή της γεωμετρίας και τον καθορισμό των φυσικών διεργασιών. Η αρχικοποίηση αυτή κατασκευάζει την γεωμετρία και τους πίνακες διασταυρωμένων τμημάτων (cross section tables) των φυσικών διεργασιών. Η εντολή αρχικοποίησης είναι η ακόλουθη:

```
/run/initialize
```

3.9 Ορισμός ενεργότητας και πηγών

Για την εισαγωγή μιας πηγής σε μια προσομοίωση GATE, ο χρήστης θα πρέπει πρώτα να ορίσει τις ιδιότητες της κατανομής της ενεργότητας (activity distribution) και στην συνέχεια την γεωμετρία της πηγής. Το GATE έχει την δυνατότητα να μοντελοποιήσει πολύπλοκες κατανομές ενεργότητας. Για κάθε καινούργιο συμβάν, ο διαχειριστής πηγών (source manager) αποφασίζει τυχαία με βάση την συνολική ενεργότητα των πηγών, ποια πηγή αποδιεγείρεται και εκπέμπει σωματίδια. Στην συνέχεια είναι αυτή η πηγή που αναλαμβάνει την εκπομπή ενός ή περισσότερων σωματιδίων. Το μοντέλο γενικευμένης πηγής σωματιδίων GPS (General Particle Source) του Geant4 χρησιμοποιείται για να εκπέμψει σωματίδια δοθέντος τύπου σε δοθείσα κατεύθυνση με δοθέντα χαρακτηριστικά κίνησης.

3.9.1 Δημιουργία πηγής

Οι προσομοιώσεις στο GATE υποστηρίζουν χρήση πολλαπλών πηγών. Κάθε πηγή είναι ανεξάρτητη. Το όνομα της καθορίζεται από τον χρήστη και διαθέτει το δικό της δένδρο εντολών:

```
/gate/source/NAME
```

όπου "NAME" είναι το αυθαίρετα ορισμένο από τον χρήστη όνομα της πηγής.

Προσθήκη πηγής

Το πρώτο βήμα αποτελεί η προσθήκη της πηγής με την ακόλουθη εντολή:

```
/gate/source/addSource NAME
```

Στο παράδειγμα αυτό προστίθενται μια πηγή με το όνομα "NAME".

Ορισμός είδους εκπομπής

Μετά την εισαγωγή της πηγής, το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των ιδιοτήτων της πηγής: **ενεργότητα, είδος, ενέργεια εκπομπής.**

Ορισμός ενεργότητας

Για τον καθορισμό της ενεργότητας μιας δοθείσας πηγής, ο χρήστης ορίζει την ποσότητα της ενεργότητας και τις μονάδες της με την επόμενη εντολή:

```
/gate/source/NAME/setActivity 5. becquerel
```

Στο παράδειγμα, η συνολική ενεργότητα της πηγής με το όνομα "NAME" ρυθμίζεται στα 5 Bq. Η ενεργότητα μπορεί επίσης να οριστεί εεξίσου και σε μονάδες Curie (Ci).

Ορισμός είδους πηγής

Το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός του είδους της πηγής. Στο GATE είναι διαθέσιμα τρία διαφορετικά είδη πηγών: **"ion", "positron"** και **"gamma"**.

Το είδος "ion" μπορεί να προσομοιώσει κάθε ιόν καθορίζοντας τον ατομικό αριθμό (Z), το ατομικό βάρος (A) και το φορτίο ιόντων σε μονάδες ενέργειας (Q) Ενσωματώνει την ραδιενεργή πυρηνική διάσπαση και αποδιέγερση.

```
/gate/source/NAME/gps/particle ion
```

```
/gate/source/NAME/gps/ion 8 15 0 0
```

Στο παραπάνω παράδειγμα χρησιμοποιείται μια πηγή οξυγόνου-15 η οποία ορίστηκε με τις ακόλουθες τιμές: Z=8, A=15, Q=0.

Εάν η παραπάνω υλοποίηση είναι πολύ αργή στην εκτέλεσή της υπάρχει η εναλλακτική επιλογή να ορίσουμε την πηγή ποζιτρονίων. Το ποζιτρόνιο πρέπει να αναγκαστεί να είναι ασταθές και στην συνέχεια μπορεί να οριστεί μέσω του χρόνου ημίσιας ζωής και του είδους της εκπεμπόμενης ενέργειάς του. Η τελευταία μπορεί να προσδιοριστεί από την μορφή του ενεργειακού διαγράμματός του.

```
/gate/source/NAME/gps/particle e+
```

```
/gate/source/NAME/gps/setForcedUnstableFlag true
```

```
/gate/source/NAME/gps/setForcedHalfLife 6586 s  
/gate/source/NAME/gps/energytype Fluor18
```

Στο παραπάνω παράδειγμα επιλέχθηκε το φθόριο-18. Τα διαφορετικά είδη κατανομών ενεργειακού φάσματος θα αναλυθούν σε επόμενη παράγραφο.

Ο τελευταίος τρόπος για τον ορισμό μιας πηγής είναι απλώς η περιγραφή της ως εκπομπή φωτονίων γάμμα. Αυτό το είδος εκπομπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση SPECT συστημάτων οι γεννητριών ακτίνων Χ.

```
/gate/source/NAME/gps/particle gamma
```

Το είδος backtoback προσδιορίζει πηγές που εκπέμπουν σε αντιδιαμετρικές κατευθύνσεις. Είναι πηγές αποκλειστικά για εφαρμογές PET. 2 φωτόνια γάμμα εκπέμπονται με απόκλιση 180 μοιρών. Με αυτό το είδος πηγής η προσομοίωση καθίσταται ταχύτερη ενώ δίνεται η δυνατότητα της επιλογής των γωνιών εκπομπής.

```
/gate/source/NAME/setType backtoback
```

Όταν χρησιμοποιούμε πηγές gamma η ραδιενεργός αποδιέγερση δεν προσομοιώνεται.

Ορισμός εκπεμπόμενης ενέργειας

Μετά τον ορισμό του είδους και της ενεργότητας, ο χρήστης μπορεί να καθορίσει και το είδος της εκπεμπόμενης ενέργειας μέσω του καθορισμού της κατανομής του αντίστοιχου ενεργειακού φάσματος.

Στο επόμενο παράδειγμα όλα τα σωματίδια έχουν την ίδια ενέργεια

```
/gate/source/NAME/gps/energytype Mono
```

Οι πιθανοί τύποι ενεργειακών κατανομών είναι: μονοενεργειακή ``Mono'', γραμμική ``Lin'', σύμφωνη με τον νόμο της ισχύος ``Pow'', εκθετική ``Exp'', Gaussian ``Gauss'', bremstrahlung ``Brem'', black-body ``Bbody'', κοσμική διαχέουσα ακτινοβολία γάμμα ``Cdg'', καθορισμένο από τον χρήστη ιστόγραμμα ``User'', αυθαίρετα point-wise φάσμα ``Arb'', και καθορισμένο από τον χρήστη ιστόγραμμα ενέργειας ανά νουκλεόνιο ``Epn''.

Στην περίπτωση των φωτονίων γάμμα και της εκπομπής back-to-back, η ενέργεια σωματιδίου είναι η ενέργεια γάμμα:

```
/gate/source/NAME/gps/monoenergy 511. keV
```

Όταν όμως χρησιμοποιούμε πηγή ποζιτρονίων, πρέπει να οριστεί το σωστό ενεργειακό φάσμα. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με καθορισμό από τον χρήστη των χαρακτηριστικών του φάσματος είτε με την επιλογή ανάμεσα από τρία προκαθορισμένα και αποθηκευμένα στο GATE φάσματα. Πρόκειται για τα ενεργειακά φάσματα του φθορίου-18, του οξυγόνου-15 και του άνθρακα-11 που είναι και τα πιο συνηθισμένα που απαντώνται σε εφαρμογές PET.

Ακολουθεί ένα παράδειγμα για το φθόριο-18 :

```
/gate/source/NAME/gps/energytype Fluor18
```

Ορισμός της κατανομής της εκπομπής

Με την βοήθεια του ενεργειακού εύρους, όπως ορίζεται παρακάτω, έχουμε την δυνατότητα να καθορίσουμε την κατανομή της γωνίας εκπομπής της πηγής μας.

```
/gate/source/NAME/gps/angtype iso  
/gate/source/NAME/gps/mintheta 90. deg
```

```
/gate/source/NAME/gps/maxtheta 90. deg  
/gate/source/NAME/gps/minphi 0. deg  
/gate/source/NAME/gps/maxphi 360. deg
```

Σε αυτήν την περίπτωση όλα τα σωματίδια έχουν την ίδια πολική γωνία (θ) ίση με 90 μοίρες. Όλα εκπέμπονται κατά μήκος διευθύνσεων κάθετες προς τον άξονα Z. Επιπλέον η αζιμουθιακή γωνία εκπομπής (ϕ) κυμαίνεται από 0 έως 360 μοίρες και επομένως κατά μήκος όλων των δυνατών αζιμουθιακών διευθύνσεων.

Στο GATE το προκαθορισμένο (default) εύρος τιμών για την πολική γωνία είναι 0-180 μοίρες και για την αζιμουθιακή 0-360 μοίρες. Το εύρος αυτό μπορεί να ελαττωθεί στην περίπτωση των πηγών back-to-back με όφελος την επιτάχυνση της προσομοίωσης.

Ορισμός του σχήματος μιας πηγής

Κατά την δημιουργία μιας πηγής στο GATE το τελευταίο βήμα είναι ο καθορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της. Η επόμενη εντολή καθορίζει το είδος της γεωμετρικής κατανομής μιας πηγής

```
/gate/source/NAME/gps/type Volume
```

Εδώ επιλέχθηκε μια κατανομή όγκου (τρισιδιάστατη κατανομή). Άλλα είδη γεωμετρικών κατανομών πηγής είναι η σημειακή "Point", επίπεδη "Plane", ακτινική "Beam" και η επιφανειακή "Surface". Η προκαθορισμένη τιμή είναι η "Point".

Στην επίπεδη "Plane" πηγή αντιστοιχούν τα ακόλουθα σχήματα:

"Circle", "Annulus", "Ellipsoid", "Square" και "Rectangle".

Στην επιφανειακή "Plane" και στην τρισδιάστατη κατανομή όγκου "Volume" αντιστοιχούν τα παρακάτω σχήματα:

"Sphere", "Ellipsoid", "Cylinder" και "Para". Το προκαθορισμένο είδος πηγής είναι η σημειακή "Point" και επομένως δεν υπάρχει προκαθορισμένο σχήμα. Φυσικά κάθε σχήμα έχει τις δικές του παραμέτρους. Για παράδειγμα

```
/gate/source/NAME/gps/shape Cylinder  
/gate/source/NAME/gps/radius 1. cm  
/gate/source/NAME/gps/halfz 1. mm
```

Στο παράδειγμα αυτό επιλέξαμε κυλινδρική πηγή με ακτίνα 1 cm και μήκος 2 mm.

Ορισμός θέσης της πηγής

Στην συνέχεια καθορίζουμε με την επόμενη εντολή τις συντεταγμένες της πηγής

```
/gate/source/NAME/gps/centre 1. 0. 0. cm
```

Εδώ το κέντρο της γεωμετρικής κατανομής της πηγής βρίσκεται σε απόσταση 1 cm από την αρχή των αξόνων, πάνω στον θετικό ημιάξονα X.

Κίνηση πηγής (confinement)

Για να μπορέσουμε να ορίσουμε στην προσομοίωση μας πηγές που θα κινούνται θα πρέπει να «συμμορφώσουμε» (confine) την γεωμετρική κατανομή της πηγής με ένα αντικείμενο του Geant4. Τα χαρακτηριστικά κίνησης αυτού του αντικειμένου μπορούν να προσδιοριστούν όπως περιγράψαμε στην παράγραφο 3.5.6. Η εντολή

```
/gate/source/NAME/gps/confine NAME_P
```

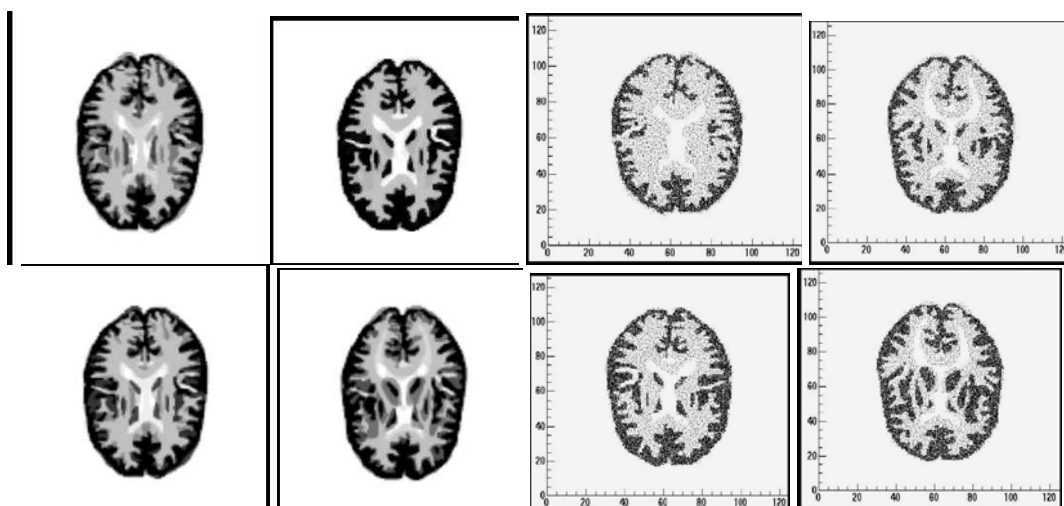
Ορίζει ότι η εκπομπή πρέπει να συμμορφωθεί με ένα αντικείμενο της γεωμετρίας του Geant4. Στην περίπτωση αυτή, η κατανομή των εκπεμπόμενων σωματιδίων είναι η τομή της γενικευμένης πηγής GPS και του αντικειμένου του Geant4. Ένα αντικείμενο του Geant4 καθορίζεται με το φυσικό του όνομα: "ΌνομαGATE+_P".

Θα πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι η διαδικασία του confinement επιβραδύνει την προσομοίωση, το αντικείμενο του Geant4 πρέπει να έχει σημεία τομής με το σχήμα της πηγής GPS και τέλος το αντικείμενο αυτό δεν θα πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερο από την πηγή.

3.9.2 Διακριτοποιημένες πηγές

Με τον όρο διακριτοποιημένη πηγή στην παράγραφο αυτή ορίζουμε τις πηγές εκείνες των οποίων η γεωμετρική κατανομή αποτελείται από μικρού μεγέθους διακριτοποιημένα στοιχεία που ονομάζονται voxels. Για αυτό και έχει καθιερωθεί ο όρος voxelised source για την περιγραφή αυτού του είδους των πηγών. Οι voxelised πηγές διαθέτουν την δυνατότητα να μοντελοποιούν πολύπλοκες γεωμετρίες όπως για παράδειγμα αληθινούς ζωικούς ιστούς ή όργανα του ανθρώπινου οργανισμού με μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον έχουν δημιουργηθεί και αντίστοιχα voxelised phantom. Το GATE υποστηρίζει την εισαγωγή τέτοιου είδους πηγών μέσω δύο διαδικασιών εισόδου: ASCII input και Interfile input. Δεν θα προχωρήσουμε σε λεπτομέρειες για τα χαρακτηριστικά αυτών των διαδικασιών. Στο σημείο αυτό επισημαίνεται πως επειδή το Geant4 υπολογίζει τα χαρακτηριστικά αλληλεπίδρασης και κίνησης κάθε voxel ένα προς ένα, η προσομοίωση μιας voxelised source ή ενός voxelised phantom καθίσταται χρονοβόρα. Το πρόβλημα επιτείνεται ακόμα περισσότερο εάν εισάγουμε και κίνηση σε ένα voxelised αντικείμενο. Ολοκληρώνουμε με ένα παράδειγμα

Με την βοήθεια ενός Interfile reader κάθε ψηφιακό phantom ή ακόμα και δεδομένα ασθενών, αποθηκευμένα σε Interfile format μπορούν να αναγνωστούν ως κατανομές εκπομπής (emission distribution). Στην συνέχεια παρουσιάζουμε στην εικόνα 3.7 το παράδειγμα που υπάρχει στην ιστοσελίδα του openGATE Collaboration και αφορά το εγκεφαλικό phantom του Hoffman όπου η κλίμακα του γκρι μεταφράστηκε σε κατανομή ενεργότητας μέσω του Interfile input.



Εικόνα 3.6: χάρτης εκπομπής (emission map) από ένα ψηφιακό Hoffman phantom (αριστερά: δεδομένα - δεξιά: μεταφρασμένες τιμές ενεργότητας).

OpenGATE Collaboration

3.10 Μονάδα ψηφιοποίησης (digitizer)

3.10.1 Περιγραφή λειτουργίας

Ο στόχος μιας μονάδας ψηφιοποίησης (θα αναφερόμαστε με τον όρο digitizer στο εξής) είναι η προσομοίωση της συμπεριφοράς των ανιχνευτών του συστήματος και της αλυσίδας επεξεργασίας του σήματος που ανιχνεύεται. Στην παράγραφο αυτή θα περιγραφούν οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων συλλογής δεδομένων (electronic readout). Για την παρουσίαση τους είναι απαραίτητη μια συνοπτική αναφορά στα κύρια βήματα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή συμβάντων σύμπτωσης (coincidence events) από την πληροφορία που μας δίνουν οι προσομοιωμένες τροχιές των σωματιδίων. Στην συνέχεια ακολουθεί μια πιο αναλυτική ανάλυση των μεθόδων για τον έλεγχο κάθε ενός από τα βήματα αυτά.

Από την ανίχνευση σωματιδίων έως την παραγωγή συμπτώσεων στο GATE.

Το GATE χρησιμοποιεί το Geant4 για την εκπομπή σωματιδίων και την μεταφορά τους μέσα από τα διάφορα υλικά. Με αυτόν τον τρόπο προσομοιώνει τις φυσικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ σωματιδίων και ύλης. Η πληροφορία που παράγεται κατά την διαδικασία αυτή, χρησιμοποιείται από το GATE για να προσομοιώσει τους παλμούς του ανιχνευτή (ψηφιακοί παλμοί- digits), που αντιστοιχούν στα παρατηρούμενα δεδομένα. Ο digitizer αντιπροσωπεύει την σειρά των βημάτων και των φίλτρων που συνθέτουν την παραπάνω διαδικασία. Μια τυπική ροή δεδομένων για ένα συμβάν αποτελείται από τα παρακάτω στάδια:

1. Ένα σωματίδιο παράγεται και εκπέμπεται ενώ καθορίζονται οι παράμετροι του, όπως αρχικό είδος σωματιδίου, χρόνος, ορμή και ενέργεια.
2. Ένα στοιχειώδες βήμα τροχιάς (στο Geant4 αναφέρεται με τον όρο step) εφαρμόζεται. Ένα βήμα (step) αντιστοιχεί στην τροχιά ενός σωματιδίου μεταξύ διακριτών αλληλεπιδράσεων. (π.χ. φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, σκέδαση Compton, παραγωγή ζεύγους κτλ). Κατά την διάρκεια ενός βήματος υπολογίζονται οι μεταβολές της ενέργειας και της ορμής του σωματιδίου. Το μήκος του βήματος εξαρτάται στην φύση της αλληλεπίδρασης, στο είδος του σωματιδίου, στο υλικό του αντικειμένου με το οποίο αλληλεπιδρά, κτλ. Ο υπολογισμός του μήκους βήματος είναι πολύπλοκος.
3. Εάν ένα βήμα συμβεί στο εσωτερικό ενός αντικειμένου που αντιστοιχεί σε sensitive detector η πληροφορία αλληλεπίδρασης μεταξύ σωματιδίου και υλικού αποθηκεύεται. Αυτή η πληροφορία μπορεί να περιέχει ενέργεια κατάθεσης, ορμή πριν και μετά την αλληλεπίδραση, το όνομα του αντικειμένου στο οποίο έγινε η αλληλεπίδραση κτλ. Αυτό το σύνολο πληροφορίας ορίζεται ως **hit**.
4. Τα στάδια 2 και 3 επαναλαμβάνονται έως η ενέργεια του σωματιδίου γίνει χαμηλότερη από την προκαθορισμένη τιμή ή έως το σωματίδιο μετακινηθεί εκτός των προκαθορισμένων ορίων. Ολόκληρη η διαδοχή των βημάτων (steps) από μια προσομοιωμένη τροχιά συνιστά την διαδρομή (στο Geant4 ορίζεται με τον όρο Track, τον οποίο και θα χρησιμοποιούμε στο εξής).
5. Η ποσότητα της ενέργειας που κατατίθεται (energy deposition) σε έναν κρύσταλλο φιλτράρεται από την μονάδα του digitizer. Η έξοδος του digitizer αντιστοιχεί στο σήμα μετά την επεξεργασία του από τα ηλεκτρονικά τμήμα (Front End Electronics - FEE) του συστήματος απεικόνισης. Γενικά το τμήμα FEE αποτελείται από πολλές ηλεκτρονικές μονάδες επεξεργασίας σήματος, συνδεδεμένες είτε σειριακά είτε παράλληλα. Αυτή διαδικασία της μετατροπής της ενέργειας ενός Hit σε μια τελική ψηφιακή τιμή ονομάζεται ψηφιοποίηση (digitization) και προσομοιώνεται από την μονάδα του digitizer στην αρχιτεκτονική του GATE. Κάθε μονάδα επεξεργασίας στο τμήμα του FEE αντιπροσωπεύεται στο GATE από μια αντίστοιχη μονάδα του digitizer. Η τελική τιμή που λαμβάνουμε μετά το φιλτράρισμα από ένα σύνολο τέτοιων μονάδων ονομάζεται **Single**. (Τα Singles μπορούν να αποθηκευτούν ως δεδομένα εξόδου). Κάθε τιμή που μεταφέρεται μεταξύ δυο μονάδων θα ονομάζεται παλμός (Pulse).

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε συμβάν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης με στόχο την παραγωγή ενός ή περισσότερων συνόλων από Singles. Τα Singles μπορούν στη

συνέχεια να αποθηκευτούν σε ένα αρχείο εξόδου (για παράδειγμα με την μορφή δένδρου του ROOT).

Μόλις δημιουργηθεί η λίστα των Singles, εισάγεται ένα δεύτερο στάδιο επεξεργασίας με στόχο την ταξινόμηση αυτής της λίστας για την δημιουργία της λίστας των Coincidences (συμβάντων σύμπτωσης). Για να επιτευχθεί αυτό, ο αλγόριθμος αναζητά στην λίστα των Singles για ζεύγη στοιχείων τα οποία ανιχνεύθηκαν μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (το λεγόμενο παράθυρο σύμπτωσης – coincidence time window). Αυτά τα ζεύγη των Singles (Singles pairs) ονομάζονται συμβάντα σύμπτωσης (είναι γνωστά ως coincidence events και αυτόν τον όρο θα χρησιμοποιούμε στο εξής).

Ορισμός του Hit

Στο Geant4 η έννοια του hit ορίζεται ως το στιγμιότυπο μιας φυσικής αλληλεπίδρασης μιας track (διαδρομής – ορίστηκε παραπάνω) μέσα στην ευαίσθητη περιοχή ενός ανιχνευτή. Η πληροφορία που μας δίνει ένα hit είναι:

- Θέση και χρονική διάρκεια βήματος
- Ορμή και ενέργεια μιας διαδρομής (track)
- Ενέργεια που εναποτίθεται σε ένα βήμα
- Είδος αλληλεπίδρασης του hit
- Όνομα αντικείμενου που περιέχει το hit

Με αυτόν τον τρόπο η ιστορία ενός σωματιδίου καταγράφεται ως μια σειρά από hits τα οποία παράγονται κατά μήκος της τροχιάς του σωματιδίου. Επιπλέον των φυσικών hits, το Geant4 καταγράφει και ένα ειδικό hit. Αυτό το hit λαμβάνει χώρα όταν ένα σωματίδιο μετακινείται από το ένα αντικείμενο στο άλλο (αυτό το είδος hit εναποθέτει μηδενική ενέργεια). Τα δεδομένα hit αντιπροσωπεύουν την βασική πληροφορία που έχει στην διάθεση του ο χρήστης και με την οποία θα μοντελοποιήσει την φυσικά παρατηρούμενη συμπεριφορά του απεικονιστικού συστήματος.

Ο ρόλος του digitizer

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η πληροφορία που περιέχεται σε κάθε hit δεν αντιστοιχεί στην πληροφορία που μας παρέχει ένας πραγματικός ανιχνευτής. Για την προσομοίωση των ψηφιακών μεγεθών (των παλμών που ορίσαμε παραπάνω) που προκύπτουν στην έξοδο των Front End Electronics, χρειάζεται να καθορίσουμε τις μεθόδους δειγματοληψίας του σήματος. Για να το πετύχουμε αυτό, θα χρησιμοποιήσουμε έναν αριθμό από μονάδες digitizer που διαθέτει το GATE και τις οποίες θα περιγράψουμε παρακάτω. Επιπρόσθετα, επειδή δίνουμε περισσότερη έμφαση στην ανάλυση της τομογραφίας εκπομπής ποζιτρονίων (PET) πρέπει στο σημείο αυτό να επισημάνουμε πως και η λογική της διέγερσης με σκανδάλη (triggering) βασίζεται σε μια ή περισσότερες αποφάσεις, οι οποίες ορίζονται από τον χρήστη μέσω της ρύθμισης ορισμένων φυσικών μεγεθών που τις επηρεάζουν, όπως το ενεργειακό κατώφλι και το χρονικό παράθυρο σύμπτωσης.

Ο ρόλος του digitizer είναι να κατασκευάσει από τις πληροφορίες του hit μεγέθη τα οποία μπορούν να αναγνωστούν και να αποθηκευτούν όπως ενέργεια, θέση και χρονική στιγμή ανίχνευσης κάθε σωματιδίου. Επιπρόσθετα, ο digitizer πρέπει να είναι σε θέση να υλοποιήσει την λογική του triggering για την προσομοίωση των coincidences κατά την διάρκεια της μοντελοποίησης συστημάτων PET. Επομένως η τυπική χρήση των μονάδων ενός digitizer περιλαμβάνει τις παρακάτω ενέργειες

- Προσομοίωση της απόκρισης του ανιχνευτή
- Προσομοίωση του συστήματος ανάγνωσης και συλλογής δεδομένων
- Προσομοίωση της λογικής του triggering για εφαρμογές PET.

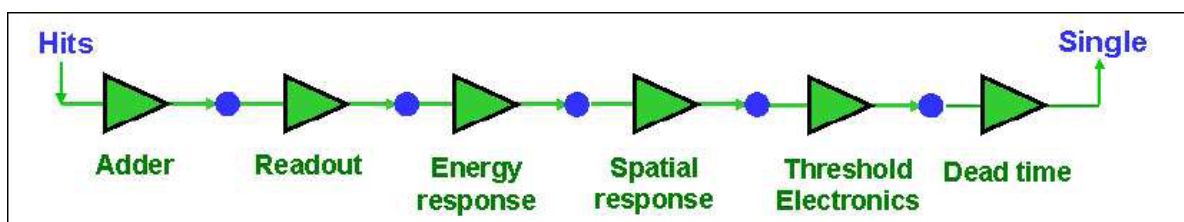
Αυτές οι ενέργειες μπορούν να επιτευχθούν με την εισαγωγή στην προσομοίωση των μονάδων digitizer που θα περιγραφούν στην συνέχεια.

3.10.2 Μονάδες digitizer

Η διαδικασία της ψηφιοποίησης αποτελείται από μια αλυσίδα από επεξεργαστές σήματος. Η έξοδος κάθε βήματος κατά μήκος της αλυσίδας ορίζεται ως παλμός (pulse). Στο τέλος της αλυσίδας οι παλμοί εξόδου ονομάζονται Singles. Αυτά τα Singles προσομοιώνουν ρεαλιστικά τα φυσικά μεγέθη που σχετίζονται με την απόκριση ενός ανιχνευτή όταν προσπίπτουν σε αυτόν σωματίδια. Στην εικόνα 3.8 παρουσιάζεται μια τέτοια αλυσίδα σταδίων επεξεργασίας. Με την επόμενη εντολή καθορίζουμε μια νέα μονάδα επεξεργασίας σήματος

```
/gate/digitizer/insert MODULE
```

όπου MODULE είναι το όνομα της νέας μονάδας digitizer.



Εικόνα 3.7: Ο digitizer είναι οργανωμένος ως μια αλυσίδα από μονάδες που ξεκινά με το hit και καταλήγει στο single που αντιπροσωπεύει τα φυσικά μεγέθη που παρατηρεί και καταγράφει ο ανιχνευτής.

Η σειρά με την οποία τοποθετούνται τα στάδια επεξεργασίας σήματος στην αλυσίδα έχει σημασία. Η συνολική επεξεργασία που καθορίζεται τόσο από το είδος όσο και από την διάταξη αυτών στην αλυσίδα θα πρέπει να είναι ορθή. Στην γενική περίπτωση η ροή δεδομένων ακολουθεί την ίδια διάταξη με εκείνη των μονάδων όπως ορίζονται στο αρχείο μακροεντολών. Επομένως η πρώτη μονάδα επεξεργασίας στην οποία θα εισέλθουν τα δεδομένα των hits θα πρέπει να οριστεί πρώτα στο macro αρχείο. Σε ένα τυπικό σύνηθες απεικονιστικό σύστημα η επόμενη ακολουθία μονάδων digitizer είναι ορθή, όμως δεν είναι και υποχρεωτική.

- Εισάγουμε την μονάδα adder πριν την μονάδα του readout
- Εισάγουμε την μονάδα του readout πριν την μονάδα thresholder/upholder
- Εισάγουμε την μονάδα blurring πριν την μονάδα thresholder/upholder

Στην συνέχεια περιγράφουμε τα χαρακτηριστικά όλων των διαθέσιμων μονάδων digitizer στο GATE.

Μονάδα Adder

Ένα σωματίδιο συχνά προκαλεί πολλαπλή αλληλεπίδραση και συνεπώς πολλαπλά hits μέσα σε έναν δεδομένο κρύσταλλο. Για παράδειγμα ένα φωτόνιο μπορεί να αλληλεπιδράσει με έναν κρύσταλλο μέσω δύο συμβάντων σκέδασης Compton και μιας φωτοηλεκτρικής απορρόφησης. Το πρώτο βήμα ενός digitizer είναι η άθροιση όλων των hits που συμβαίνουν μέσα στον ίδιο κρύσταλλο (δηλ. στο ίδιο αντικείμενο). Η άθροιση αυτή είναι αναγκαία διότι τα ηλεκτρονικά συστήματα μετρούν πάντα ένα σήμα ολοκλήρωσης και δεν έχουν την απαραίτητη χρονική ενεργειακή ανάλυση για να διακρίνουν μεταξύ τους τις πολλαπλές αλληλεπιδράσεις ενός σωματιδίου μέσα σε ένα κρύσταλλο. Αυτή η ενέργεια του digitizer υλοποιείται μέσω της μονάδας του αθροιστή (adder). Στην γενική περίπτωση ο adder αποτελεί την πρώτη μονάδα της αλυσίδας του digitizer.

Ο adder δρα στο χαμηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας του συστήματος και αυτό δημιουργεί τις ακόλουθες απαιτήσεις

1. Χρησιμοποίηση απαραίτητως ενός από τα προκαθορισμένα συστήματα για την περιγραφή της γεωμετρίας.

2. Το χαμηλότερο επίπεδο του συστήματος θα πρέπει να έχει συνδεθεί με το αντικείμενο του ανιχνευτή και θα πρέπει να έχει δηλωθεί ως sensitive detector.

Ο adder ομαδοποιεί τα hits ανά αντικείμενο και κάθε τέτοια ομάδα αποτελεί και έναν παλμό. Εάν ένα σωματίδιο που έχει προσπέσει σε έναν ανιχνευτή προκαλέσει πολλαπλά hits μέσα σε δύο διαφορετικά κρυσταλλικά αντικείμενα πριν σταματήσει, η έξοδος της μονάδας του adder θα αποτελείται από δύο παλμούς. Κάθε παλμός υπολογίζεται όπως παρακάτω:

- Η ενέργεια θεωρείται πως είναι το σύνολο των ενεργειών σε κάθε αντικείμενο
- Η πληροφορία θέσης αποκτάται με την βοήθεια ενός ενεργειακού κέντρου βάρους των διαφορετικών θέσεων των hit.
- Η χρονική στιγμή είναι η ίδια με την αντίστοιχη του πρώτου hit.

Η εντολή που χρησιμοποιούμε για την προσθήκη της μονάδας του adder είναι

```
/gate/digitizer/Singles/insert adder
```

Μονάδα Readout

Εάν εξαιρέσουμε το σύστημα ανίχνευσης όπου κάθε κρύσταλλος διαβάζεται από έναν ατομικό φωτο-ανιχνευτή, η τμηματοποίηση του readout (readout segmentation) είναι συχνά διαφορετική από τις βασικές γεωμετρικές δομές του ανιχνευτή. Η γεωμετρία του readout είναι μια τεχνητή γεωμετρία που συνήθως σχετίζεται με μια ομάδα από sensitive detectors. Αυτή η ομαδοποίηση θα πρέπει να καθοριστεί από τον χρήστη μέσω μιας μεταβλητής με το όνομα depth (βάθος) που δηλώνει επίπεδο συστήματος. Με την χρήση αυτής της μεταβλητής, αθροίζονται εκείνοι οι παλμοί, των οποίων οι παράμετροι VolumeID (αναγνωριστικά αντικειμένων) είναι οι ίδιες στο επίπεδο depth.

Η μονάδα readout αναδιατάσσει τους παλμούς ανά block (με τον όρο αυτό ορίζουμε γενικά μια ομάδα από sensitive detectors που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο ιεραρχίας). Ο χρήστης χρειάζεται να καθορίσει το depth του block για να προσδιορίσει το επίπεδο της ιεραρχίας αντικειμένων στο οποίο οι παλμοί θα αθροίζονται μαζί. Τα δεδομένα εξόδου αυτής της μονάδας είναι

- Η συνολική ενέργεια ενός block
- Η θέση του παλμού με την μέγιστη ενέργεια (μέθοδος winner-takes-all)

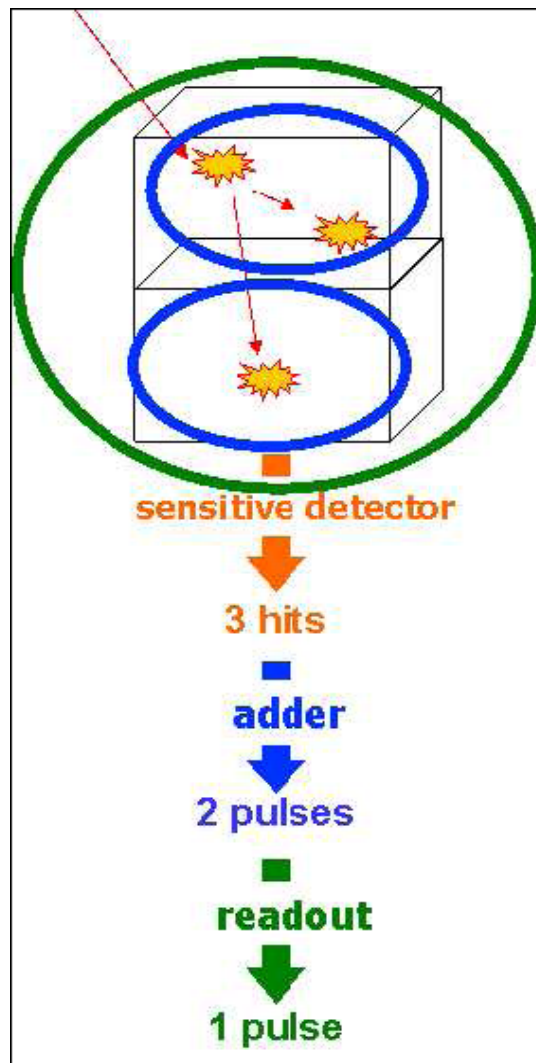
Για την εισαγωγή μιας μονάδας readout χρησιμοποιούμε τις εντολές

```
/gate/digitizer/Singles/insert readout  
/gate/digitizer/Singles/readout/setDepth 1
```

Στην εικόνα 3.9 παρουσιάζεται η λειτουργία των μονάδων adder και readout. Η μονάδα adder μετατρέπει τα hits σε παλμούς σε κάθε ξεχωριστό αντικείμενο και στην συνέχεια η μονάδα readout αθροίζει μια ομάδα από αυτούς τους παλμούς σε έναν παλμό στο επίπεδο depth που ορίζει ο χρήστης.

Μονάδα Ενεργειακής Απόκλισης (Blurring)

Η μονάδα επεξεργασίας παλμών blurring προσομοιώνει την απόκλιση μορφής Gauss από μια κεντρική τιμή του ενεργειακού φάσματος του παλμού μετά την έξοδο της μονάδας readout. Η απόκλιση αυτή περιγράφεται στην διεθνή βιβλιογραφία με τον όρο blurring και αυτόν τον όρο θα χρησιμοποιούμε στο εξής.



Εικόνα 3.8 : Λειτουργία των μονάδων *adder* και *readout* .

Η προσομοίωση αυτού του φαινομένου από την μονάδα *blurring* επιτυγχάνεται με την εισαγωγή μιας ενεργειακής ανάλυσης (energy resolution) R_0 (FWHM) σε δεδομένη ενέργεια E_0 . Εξετάζοντας μια διαδικασία Poisson γίνεται φανερό πως η ανάλυση αποτελεί συνάρτηση της ενέργειας, δηλ. $R(E)$, η οποία είναι ανάλογη του $1/\sqrt{E}$. Η ανάλυση θα είναι ίση με:

$$R = \frac{R_0 \sqrt{E_0}}{\sqrt{E}}$$

Μια κατανομή Gauss ορίζεται από την μέση τιμή της m και την τυπική της απόκλιση σ . Η ανάλυση μια κατανομής Gauss δίνεται από την σχέση

$$R = 2\sqrt{2 \ln 2} \frac{\sigma}{m} \approx 2.35 \frac{\sigma}{m}$$

Για την χρήση μιας μονάδας *blurring* θα πρέπει πρώτα να εισάγουμε την μονάδα στην αλυσίδα, να καθορίσουμε την ανάλυση και τέλος την ενέργεια αναφοράς.

Επομένως για να εφαρμόσουμε μια ενεργειακή ανάλυση 15% στα 511keV έχουμε:

```
/gate/digitizer/Singles/blurring
/gate/digitizer/Singles/blurring/setResolution 0.15
/gate/digitizer/Singles/blurring/setEnergyOfReference 511. keV
```

Τοπικό blurring για έναν block ανιχνευτή

Αυτό το είδος blurring χρησιμοποιείται για σαρωτές όπου όλοι οι ανιχνευτές είναι το ίδιο είδος κρυστάλλου. Σε αυτήν την περίπτωση είναι συχνά χρήσιμο να αναθέσουμε διαφορετική ενεργειακή ανάλυση για κάθε κρύσταλλο μέσα στο block ανιχνευτών, μεταξύ μιας μέγιστης και ελάχιστης τιμής. Επιπλέον για να μπορέσουμε να μοντελοποιήσουμε την κβαντικά απόδοση του συστήματος υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της τιμής ενός συντελεστή μεταξύ 0 και 1.

Στο επόμενο παράδειγμα ορίζουμε ένα τυχαίο blurring όλων των κρυστάλλων μεταξύ 15% και 35% γύρω από την ενέργεια αναφοράς των 511keV και με κβαντική απόδοση (quantum efficiency) 90%.

```
/gate/digitizer/Singles/insert crystalblurring
/gate/digitizer/Singles/crystalblurring/setCrystalResolutionMin 0.15
/gate/digitizer/Singles/crystalblurring/setCrystalResolutionMax 0.35
/gate/digitizer/Singles/crystalblurring/setCrystalQE 0.9
/gate/digitizer/Singles/crystalblurring/setCrystalEnergyOfReference
511.keV
```

Στο παραπάνω παράδειγμα, για κάθε αλληλεπίδραση το GATE επιλέγει τυχαία μια ενεργειακή ανάλυση μεταξύ 0.15 και 0.35. Δεν ανατίθεται στους κρυστάλλους μια σταθερή ανάλυση. Οι παράμετρος τη κβαντικής απόδοσης του κρυστάλλου είναι σταθερή και εκφράζει την πιθανότητα να ανιχνευθεί ένα συμβάν από τον φωτο-ανιχνευτή. Επισημαίνουμε στο σημείο αυτό πως υπάρχουν και άλλα είδη blurring διαθέσιμα από το GATE τα οποία εφαρμόζονται σε πιο ειδικές περιπτώσεις και τα οποία δεν θα περιγράψουμε στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Συνοπτικά θα αναφέρουμε την μονάδα LocalBlurring που είναι όμοια με την μονάδα blurring αλλά σε αυτή την περίπτωση εφαρμόζονται διαφορετικές ενεργειακές αναλύσεις σε διαφορετικά αντικείμενα και χρησιμοποιείται σε απεικονιστικά συστήματα με πολλαπλά επίπεδα διαφορετικών κρυστάλλων ανιχνευτών.

Μονάδα παρεμβολής (crosstalk)

Η μονάδα παρεμβολής (στο εξής crosstalk) είναι ένας επεξεργαστής παλμών για την προσομοίωση των οπτικών και ηλεκτρονικών παρεμβολών των φωτονίων σπινθηρισμού μεταξύ γειτονικών κρυστάλλων. Έτσι εάν ένας παλμός εισόδου φτάσει σε έναν κρυσταλλικό πίνακα αυτή η μονάδα δημιουργεί παλμούς γύρω από το κρύσταλλο πρόσπτωσης του παλμού (συγκεκριμένα στους πλευρικούς και γωνιακούς γειτονικούς του κρυστάλλου). Το ποσοστό της ενέργειας που απορροφάται από τους γειτονικούς κρυστάλλους καθορίζεται από τον χρήστη. Απαραίτητη προϋπόθεση για την λειτουργία της μονάδας crosstalk είναι το αντικείμενο στο οποίο εφαρμόζεται να έχει αναπαραχθεί με την βοήθεια ενός array repeater. Για να εισάγουμε μια μονάδα crosstalk που κατανέμει 10% της ενέργειας του εισερχόμενου παλμού στους πλευρικούς γειτονικούς και 5% στους γωνιακούς γειτονικούς κρυστάλλους χρησιμοποιούμε τις επόμενες εντολές

```
/gate/digitizer/Singles/insert crosstalk
/gate/digitizer/Singles/crosstalk/chooseCrosstalkVolume crystal
/gate/digitizer/Singles/crosstalk/setEdgesFraction 0.1
/gate/digitizer/Singles/crosstalk/setCornersFraction 0.05
```

Μονάδα άνω/κάτωφλίσωσης Upholder & Thresholder

Η μονάδα άνω/κάτωφλίσωσης (στο εξής Upholder/Thresholder) επιτρέπει στον χρήστη να εφαρμόσει ένα ζωνοπερατό ενεργειακό φίλτρο για να αφαιρέσει από τη προσομοίωση φωτόνια χαμηλών και υψηλών ενεργειών. Το κάτω όριο (για χαμηλές ενέργειες), ου παρέχεται από τον χρήστη, εκφράζει την απόκριση ενός κατωφλίου κάτω από το οποίο ο

ανιχνευτής παραμένει ανενεργός. Το άνω όριο (για υψηλές ενέργειες, που επίσης παρέχεται από τον χρήστη, ορίζει την μέγιστη ενέργεια που θα καταγράψει ο ανιχνευτής. Τόσο για εφαρμογές PET όσο και για SPECT, η ορθή και προσεκτική ρύθμιση αυτών των ενεργειακών παραθύρων είναι κρίσιμη για τον περιορισμό σκέδασης, για την ανακατασκευή της εικόνας και για την επίδοση του ρυθμού μέτρησης.

Σε ένα σύνηθες PET σύστημα η επιλογή της ενέργειας της φωτο κορυφής πραγματοποιείται με τις ακόλουθες εντολές. Βέβαια θα ήταν χρήσιμο να χρησιμοποιήσουμε ορισμένες φορές ως χαμηλό κατώφλι τα 0 keV για να μπορέσουμε να δούμε όλα τα συμβάντα έτσι ώστε να βελτιστοποιήσουμε την προσομοίωση.

Χρονική ανάλυση(temporal resolution)

Η μονάδα χρονικής ανάλυσης (temporal resolution) εισάγει blurring μορφής Gauss αυτή τη φορά στο πεδίο του χρόνου. Διαθέτει τις ίδιες ιδιότητες λειτουργίας με την μονάδα blurring αλλά στο πεδίο του χρόνου και όχι της ενέργειας.

Για να καθορίσουμε μια χρονική ανάλυση μορφής Gauss (FWHM) 1.4ns εισάγουμε

```
/gate/digitizer/Singles/insert timeResolution  
/gate/digitizer/Singles/timeResolution/setTimeResolution 1.4 ns
```

Χωρική απόκλιση (spatial blurring) στο PET

Στην ανάλυση PET τα coincidence events (συμβάντα σύμπτωσης) παρέχουν τις γραμμές απόκρισης (γνωστές στην διεθνή βιβλιογραφία με τον όρο line of response – LOR) που είναι απαραίτητες για την ανακατασκευή της εικόνας. Μόνο η πληροφορία των αριθμών των δύο κρυστάλλων που δημιουργούν κάθε φορά μια LOR μεταφέρεται στην προσομοίωση. Η επιλογή κάθε κρυστάλλου βασίζεται στην ενέργεια που εναποτίθεται στον καθένα. Επιλέγεται εκείνος ο κρύσταλλος στον οποίο εναποτέθηκε η υψηλότερη ενέργεια. Χωρίς επιπρόσθετο spatial blurring σε κάθε κρύσταλλο, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων θα εμφανίζουν πάντα καλύτερη χωρική ανάλυση (spatial resolution) από τα αντίστοιχα πειραματικά. Η μονάδα που εισάγει spatial blurring υποστηρίζεται μόνο από το σύστημα ecats το οποίο θα αναλύσουμε διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο στα πλαίσια της παρουσίας της προσομοίωσης του PET συστήματος ECAT HR+. Το spatial blurring βασίζεται σε μια δισδιάστατη συνάρτηση Gauss. Ένα παράδειγμα εισαγωγής ακολουθεί

```
#           E C A T 7  
/gate/output/sinogram/enable/gate/output/sinogram/RadialBins  
Your_Sinogram_Radial_Bin_Number  
/gate/output/sinogram/setTangCrystalBlurring Your_Value_1 mm  
/gate/output/sinogram/setAxialCrystalBlurring Your_Value_2 mm
```

Μονάδα ταξινόμησης συμπτώσεων (coincidence sorter)

Σύμφωνα με όσα αναπτύξαμε παραπάνω, όποτε δύο singles βρεθούν μέσα στο ίδιο coincidence window (παράθυρο σύμπτωσης) ομαδοποιούνται για να σχηματίσουν ένα Coincidence event. Κάθε single το οποίο εκπέμπεται από το ίδιο σωματίδιο πηγής αποθηκεύεται με το ίδιο αναγνωριστικό συμβάντος (στο εξής event ID number). Εάν δύο event ID δεν είναι ταυτόσημα σε ένα coincidence event, τότε το συμβάν ορίζεται ως τυχαία σύμπτωση (στο εξής random coincidence). Για να αποκλίσουμε εσφαλμένο coincidence που προέρχεται από το ίδιο σωματίδιο αλλά έχει σκεδαστεί από ένα block προς το γειτονικό του, γίνεται ένας έλεγχος στην εγγύτητα των δύο block που σχηματίζουν το coincidence event. Είναι προκαθορισμένο από το GATE να γίνονται εκείνα τα coincidence δεκτά , για τα οποία η διαφορά των αριθμών των δύο blocks είναι μεγαλύτερη από δύο. Η απόρριψη αυτή μπορεί να ρυθμιστεί πιο συγκεκριμένα μεταβάλλοντας την ελάχιστη τιμή της διαφοράς των αριθμών των blocks με την παρακάτω εντολή

/gate/digitizer/Coincidences/minSectorDifference [number]

Επιπρόσθετα, όταν περισσότερα από δύο singles βρεθούν στο ίδιο coincidence window δεν αντιμετωπίζονται ως έγκυρα coincidence. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό πως αυτή η απόρριψη ίσως να μην αντικατοπτρίζει την αληθινή συμπεριφορά του συστήματος συλλογής δεδομένων ενός PET συστήματος. Στο μέλλον, ίσως προσομοιωθεί στο GATE και η απόκριση πολλαπλών events. Όταν χρησιμοποιούμε έναν coincidence sorter, η μόνη παράμετρος που απαιτείται να προσδιοριστεί είναι το εύρος του coincidence window.

Έτσι εάν θέλουμε να ρυθμίσουμε το εύρος του coincidence window στα 10ns, εισάγουμε

/gate/digitizer/Coincidences/setWindow 10. ns

Νεκρός χρόνος απόκρισης (dead time)

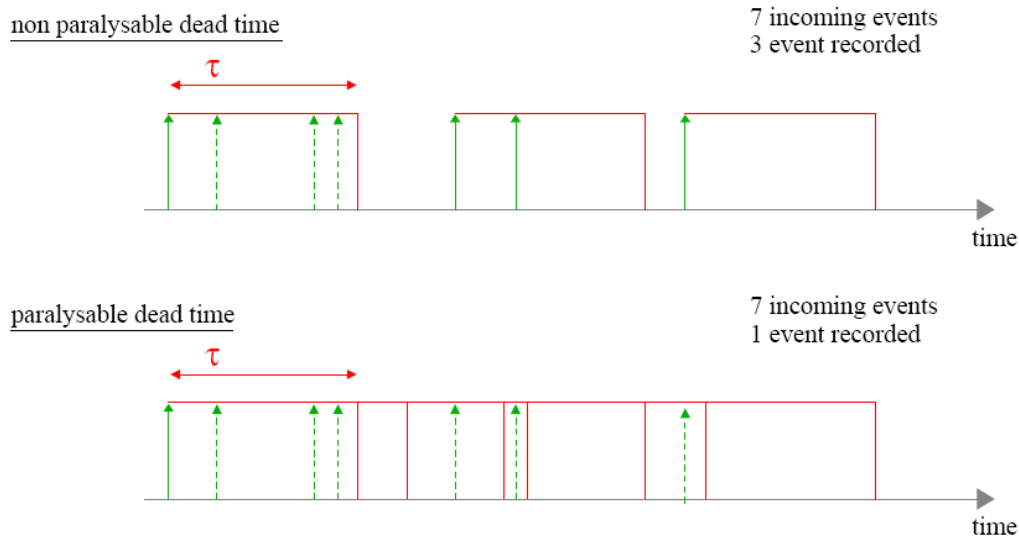
Με τον όρο dead time στην διεθνή βιβλιογραφία ορίζουμε την ελάχιστη χρονική διάρκεια που πρέπει να μεσολαβήσει μεταξύ του χρόνου άφιξης δύο σωματιδίων έτσι ώστε ο ανιχνευτής, που καταγράφει το πρώτο σωματίδιο να μπορέσει να ανιχνεύσει και το επόμενο. Πρόκειται δηλαδή για τον χρονικό διάστημα εντός του οποίου ο ανιχνευτής δεν αποκρίνεται σε καμία διέγερση και για αυτό ονομάζεται νεκρός (dead) χρόνος απόκρισης του ανιχνευτή.

Δύο μοντέλα της συμπεριφοράς του dead time του ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης έχουν υλοποιηθεί στον digitizer του GATE. Η απόκριση παράλυσης (paralysable response) και η απόκριση μη-παράλυσης (nonparalysable response).

Αυτά τα μοντέλα αντιπροσωπεύουν την ιδανική συμπεριφορά και μπορούν να υλοποιηθούν συμβάν προς συμβάν (event by event) κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Οι θεμελιώδεις αρχές αυτών των δύο μοντέλων φαίνονται στην εικόνα 3.10. Η διαφορά τους έγκειται στο είδος της απόκρισης ενός ανιχνευτή κάθε φορά που εμφανίζεται στην είσοδο του συστήματος μέτρησης ένα έγκυρο event. Συγκεκριμένα στην περίπτωση του nonparalysable μοντέλου η απόκριση νεκρού χρόνου ενεργοποιείται κάθε φορά που εισέρχεται ένα έγκυρο event με την προϋπόθεση ότι το σύστημα βρίσκεται αρχικά σε ενεργή κατάσταση και όχι σε κατάσταση dead time. Σε περίπτωση που βρίσκεται σε κατάσταση dead time τότε δεν ενεργοποιείται εκ νέου η απόκριση νεκρού χρόνου και επομένως δεν ανανεώνεται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο ανιχνευτής παραμένει ανενεργός.

Αντίθετα στην περίπτωση του paralysable μοντέλου η απόκριση νεκρού χρόνου του ανιχνευτή ενεργοποιείται εκ νέου κάθε φορά που εισέρχεται ένα έγκυρο event ανεξάρτητα από την αρχική κατάσταση του ανιχνευτή. Έτσι εάν ο ανιχνευτής βρίσκεται σε κατάσταση dead time απόκρισης μόλις εισέλθει ένα έγκυρο event ο dead time ανανεώνεται και μετράει αντίστροφα από την αρχή. Θα πρέπει να μεσολαβήσει χρονικό διάστημα μεγαλύτερο του dead time για α επανέλθει ο ανιχνευτής στην ενεργή κατάσταση.

Από την σύγκριση των δύο μοντέλων είναι προφανές πως όταν έχουμε μεγάλη συχνότητα έγκυρων events τότε το paralysable μοντέλο οδηγεί στην απόρριψη μεγαλύτερου ποσοστού events σε σχέση με το nonparalysable. Στην επόμενο κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθεί το nonparalysable μοντέλο για την προσομοίωση της απόκρισης dead time των ανιχνευτών της HR+.



Εικόνα 3.9: Για 7 εισερχόμενα σωματίδια και ένα καθορισμένο *dead-time* τ , το *nonparalysable* μοντέλο του ηλεκτρονικού συστήματος ανάγνωσης δεδομένων (*electronic readout*) θα καταγράψει 3 σωματίδια ενώ το *paralysable* μοντέλο θα καταγράψει μόνο 1 σωματίδιο.

Η μονάδα *dead time* εφαρμόζεται σε ένα συγκεκριμένο αντικείμενο εντός της ιεραρχίας του συστήματος των *sensitive detector*. Όλα τα *events* που λαμβάνουν χώρα μέσα σε αυτό το επίπεδο αντικειμένου θα προκαλέσουν μια απόκριση *dead time* στον ανιχνευτή.

Έτσι για να εφαρμόσουμε απόκριση νεκρού χρόνου στο αντικείμενο `volume_name` (το οποίο θα πρέπει προηγουμένως να έχει συνδεθεί σε ένα επίπεδο του δεδομένου συστήματος) χρησιμοποιούμε τις ακόλουθες εντολές.

```
# ATTACHMENT TO THE SYSTEM
/gate/systems/system_name/system_level_name/attach volume_name
.
.
# DEADTIME
/gate/digitizer/Singles/insert deadtime
/gate/digitizer/Singles/deadtime/setDeadTime 100000. ns
/gate/digitizer/Singles/deadtime/setMode paralysable
/gate/digitizer/Singles/deadtime/chooseDTVolume volume_name
```

3.11 Δεδομένα εξόδου

Τα δεδομένα εξόδου αποτελεί σημείο κλειδί για ένα πακέτο λογισμικού το οποίο προορίζεται να χρησιμοποιηθεί για διάφορες εφαρμογές, από διάφορες επιστημονικές κοινότητες. Για αυτόν τον λόγο τα μέλη του OpenGATE Collaboration αποφάσισαν το GATE να υποστηρίζει πολλές μορφές δεδομένων εξόδου, οι οποίες μπορούν να ενεργοποιηθούν ή να απενεργοποιηθούν όποτε χρειάζεται.

Σε αυτήν την παράγραφο θα αναφερθούμε σε ορισμένους από τους τύπους δεδομένων εξόδου (*data output formats*) που διαθέτει το GATE και οι οποίοι είναι:

ASCII, Root, Interfile, LMF, ECAT.

Στην συνέχεια θα αναφερθούμε συγκεκριμένα στους τύπους ROOT και ECAT που θα χρησιμοποιηθούν στο επόμενο κεφάλαιο για την προσομοίωση του απεικονιστικού συστήματος της HR+.

3.11.1 Τύπος δεδομένων εξόδου ROOT

Ενεργοποίηση του ROOT output

Για την παραγωγή αρχείων εξόδου τύπου ROOT προσθέτουμε την ακόλουθη εντολή στο αρχείο μακροεντολών (macro file)

```
/gate/output/root/setFileName FILE_NAME
```

η οποία θα δημιουργήσει το αρχείο FILE_NAME.root .

Εάν η προηγούμενη εντολή δεν υπάρχει στο αρχείο μακροεντολών και εάν το υποδένδρο

```
/gate/output/root
```

δεν είναι απενεργοποιημένο τότε το προκαθορισμένο όνομα του αρχείου εξόδου θα είναι gate.root .Επισημαίνεται ότι ανάλογα δημιουργείται και το αρχείο gateVoxels.root όταν χρησιμοποιούμε ένα voxelized phantom στην προσομοίωση.

Είναι προκαθορισμένο το αρχείο ROOT να περιέχει 4 ιστογράμματα, 1 Ntuple (Gate), και 2 δένδρα για συστήματα SPECT (Hits και Singles) ή 3 δένδρα για συστήματα PET (Hits, Singles και Coincidences) στα οποία αποθηκεύονται πολλές διαφορετικές μεταβλητές.

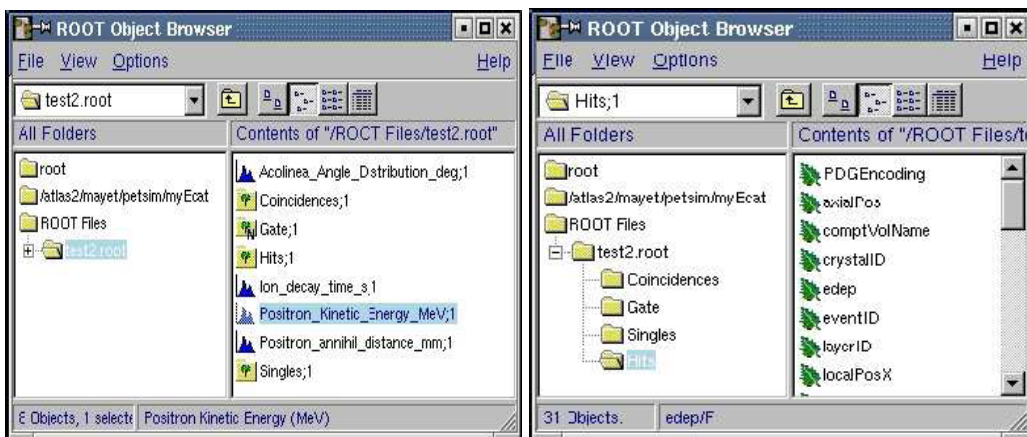
Οι πληροφορίες που περιέχονται στα 4 ιστογράμματα και στο Ntuple αφορούν προσομοιώσεις PET συστημάτων. Εμφανίζονται και σε προσομοιώσεις SPECT αλλά είναι άδεια. Τα 4 ιστογράμματα περιέχουν κατανομές των ακόλουθων φυσικών μεγεθών

- **Acolinea_Angle_Distribution**: γωνία σε μοίρες μεταξύ των δύο ακτίνων γάμμα της αντίδρασης της εξαύλωσης β^+
- **Positron_Kinetic_Energy_MeV** : η κινητική ενέργεια των β^+
- **Ion_decay_time_s** : ο χρόνος αποδιέγερσης
- **Positron_annihil_distance_mm** : το βεληνεκές των β^+

Στο Ntuple του GATE είναι διαθέσιμες 4 παρόμοιες μεταβλητές έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ανάλυσης κάθε συσχέτισης μεταξύ τους.

Με τις ακόλουθες εντολές εκκινεί το πρόγραμμα του ROOT και μπορούμε να δούμε το περιεχόμενο ενός αρχείου root, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.12.

```
root file.root  
root [1] TBrowse t
```



Εικόνα 3.10: Ο Object Browser του ROOT όταν ανοίγουμε το αρχείο εξόδου του GATE που περιέχει : 4 ιστογράμματα και 4 δένδρα (GATE, COINCIDENCES, HITS and SINGLES) στα οποία, όπως φαίνεται, είναι αρκετές μεταβλητές αποθηκευμένες.

Απενεργοποίηση του ROOT output

Εάν κριθεί απαραίτητο και κυρίως για λόγους οικονομίας αποθηκευτικού χώρου μπορεί να γίνει επιλεκτική παραγωγή των δένδρων από το αρχείο εξόδου.

Στην περίπτωση αυτή προσθέτουμε τις ακόλουθες εντολές

```
/gate/output/root/setRootHitFlag 0  
/gate/output/root/setRootSinglesFlag 0  
/gate/output/root/setRootCoincidencesFlag 0  
/gate/output/root/setRootNtupleFlag 0
```

Μεταβάλλοντας τις τιμές των σημαιών κάθε δένδρου σε 1 επιλέγεις το αντίστοιχο δένδρο να γεμίζει με δεδομένα. Θέτεις την τιμή 0 στις σημαίες εκείνων των δένδρων τα οποία δεν επιθυμείς να παράγει το αρχείο εξόδου.

Σε κατάσταση ελέγχου και διόρθωσης σφαλμάτων της προσομοίωσης θα ήταν χρήσιμο να αποθηκεύεις σε δένδρο τις πληροφορίες μετά την εφαρμογή μιας συγκεκριμένης μονάδας της αλυσίδας του digitizer. Οι ακόλουθες σημαίες χρησιμεύουν στην ενεργοποίηση αυτών των ενδιάμεσων δένδρων.

```
/gate/output/root/setOutFileSinglesAdderFlag 0  
/gate/output/root/setOutFileSinglesReadoutFlag 0  
/gate/output/root/setOutFileSinglesSpblurringFlag 0  
/gate/output/root/setOutFileSinglesBlurringFlag 0  
/gate/output/root/setOutFileSinglesThresholdFlag 0  
/gate/output/root/setOutFileSinglesUpholderFlag 0
```

Ανάλυση δεδομένων εξόδου ROOT

Υπάρχει η δυνατότητα να σχεδιαστούν οι γραφικές παραστάσεις των μεταβλητών είτε κατευθείαν με την χρήση του Object Browser του ROOT είτε μέσω ενός αρχείου μακροεντολών ROOT (για παράδειγμα analysis.C). Σε αυτή την περίπτωση εισάγουμε την εντολή

```
root [0] .x analysis.C
```

Δεν θα προχωρήσουμε στην ανάλυση των μακροεντολών και των κλάσεων του προγράμματος ανάλυσης δεδομένων ROOT. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στην ηλεκτρονική ιστοσελίδα της ομάδας ανάπτυξης και βελτιστοποίησης του ROOT: <http://root.cern.ch/>

3.11.2 Ημιτονόγραμμα (Sinogram Output)

Εάν επιλεγεί το προκαθορισμένο σύστημα ecat , η μονάδα εξόδου sinogram (ημιτονόγραμμα) θα ενεργοποιηθεί αυτόματα εκτός εάν δοθεί η εντολή

```
/gate/output/sinogram/disable
```

Αυτή η μονάδα αποθηκεύει τα coincidence events σε έναν πίνακα δισδιάστατων ημιτονογραμμάτων (2D sinograms). Υπάρχει ένα 2D sinogram ανά ζεύγος κρυσταλλικών δακτυλίων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του συστήματος ECAT EXACT HR+ από την εταιρεία CPS Innovations, που θα προσομοιώσουμε στο επόμενο κεφάλαιο, υπάρχουν 32 κρυσταλλικοί δακτύλιοι και 1024 2D sinograms. Τα στοιχειώδη τμήματα στα οποία χωρίζουμε ένα μήκος κατά μια διεύθυνση με σκοπό να πάρουμε μετρήσεις ανά τμήμα τα ονομάζουμε με τον όρο bins. Ο αριθμός των ακτινικών τμημάτων (radial bins) ορίζεται από την εντολή

/gate/output/sinogram/RadialBins 256

Για ένα σύστημα με N_{cryst} ανά κρυσταλλικό δακτύλιο, η προκαθορισμένη τιμή είναι ίση με $N_{cryst}/2$. Ο αριθμός των ακτινικών bins θα πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος με το N_{cryst} . Ο αριθμός των αζιμούθιων bins είναι προκαθορισμένος και σταθερός στην τιμή $N_{cryst}/2$. Η προκαθορισμένη ρύθμιση για το σύστημα ECAT EXACT HR+ (με 576 κρυστάλλους ανά δακτύλιο) αντιστοιχεί σε ένα 2D sinogram μεγέθους 288×288 .

Υπάρχει 1-1 (ένα προς ένα) αντιστοιχία μεταξύ των sinogram bins και τον γραμμών απόκρισης (LOR) που συνδέουν δύο κρυστάλλους σε ένα συμβάν σύμπτωσης. Η ανάθεση ενός sinogram bin δεν βασίζεται στην πραγματικής ακτινική και αζιμουθιακή θέση της LOR, αλλά στην οργάνωση των κρυστάλλων ανιχνευτών στην ανιχνευτική διάταξη. Αυτό σημαίνει πως τα ημιτονογράμματα υπόκεινται σε επιδράσεις καμπύλης μορφής.

Είναι προκαθορισμένο όλα τα coincidence events να καταγράφονται ανεξάρτητα από την προέλευσή τους (τυχαία -random-, πραγματικά και μη σκεδαζόμενα -true unscattered-, και πραγματικά σκεδαζόμενα (true scattered). Υπάρχει η δυνατότητα απόρριψης των τυχαίων συμβάντων.

/gate/output/sinogram/TruesOnly true

Στα πραγματικά events περιλαμβάνονται τόσο σκεδαζόμενες όσο και μη σκεδαζόμενες coincidences. Δεν υπάρχει προσομοίωση ενός καθυστερημένου παραθύρου σύμπτωσης (delayed coincidence window).

Στην έναρξη κάθε εκτέλεσης της προσομοίωσης, το περιεχόμενο των 2D sinograms μηδενίζεται. Στο τέλος κάθε εκτέλεσης τα περιεχόμενα των 2D sinograms μπορούν να γραφούν σε ένα αρχείο δεδομένων που δεν έχουν επεξεργασθεί (raw file) – ένα για κάθε εκτέλεση. Αυτή η δυνατότητα πρέπει να ενεργοποιηθεί

/gate/output/sinogram/RawOutputEnable

Το όνομα του αρχείου καθορίζεται από την εντολή

/gate/output/sinogram/setFileName MySinogramFileName

Σε κάθε εκτέλεση γράφονται τρία αρχεία

- Τα μη επεξεργασμένα δεδομένα (unsigned short integer) στο αρχείο MySinogramFileName.ima
- Ένας μικρός ASCII header στο αρχείο MySinogramFileName.dim
- Ένα αρχείο πληροφορίας στο αρχείο MySinogramFile.info

Το αρχείο MySinogramFileName.dim περιέχει την ελάχιστη απαιτούμενη πληροφορία για την ανάγνωση του επίπεδου φακέλου MySinogramFileName.ima. Ακολουθώς παρουσιάζουμε ένα παράδειγμα για τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις του συστήματος ECAT EXACT HR+.

288 288 1024

-type U16

-dx 1.0

-dy 1.0

-dz 1.0

Η πρώτη γραμμή καθορίζει το μέγεθος της μήτρας: 1024 2D sinograms (τρίτη συντεταγμένη) με 288 ακτινικά bins (πρώτη συντεταγμένη) και 288 αζιμούθια bins. (δεύτερη συντεταγμένη). Η δεύτερη γραμμή καθορίζει το είδος των δεδομένων εξόδου (format): unsigned short integer. Οι επόμενες τρεις γραμμές καθορίζουν το μέγεθος κάθε bin, τα οποία στο παράδειγμα ορίστηκαν αυθαίρετα από τους χρήστες στην τιμή της μονάδας.

Το αρχείο MySinogramFile.info περιγράφει την διάταξη των 2D sinograms στο επίπεδο αρχείο με όνομα MySinogramFile.ima .Ακολουθεί ένα παράδειγμα με τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις για το σύστημα ECAT EXACT HR+

```
1024 2D sinograms
[RadialPosition;AzimuthalAngle;AxialPosition;RingDifference]
RingDifference varies as 0,+1,-1,+2,-2, ...,+31,-31
AxialPosition varies as |RingDifference|,...,62-|RingDifference| per
increment of 2
AzimuthalAngle varies as 0,...,287 per increment of 1
RadialPosition varies as 0,...,287 per increment of 1
Date type : unsigned short integer (U16)
```

Κάθε 2D sinogram χαρακτηρίζεται από δύο κρυσταλλικούς δακτυλίους σε σύμπτωση: Τον $ring_1$ και τον $ring_2$. Αντί να ταξινομηθούν τα ημιτονογράμματα ανά $ring_1$ και $ring_2$, χρησιμοποιείται ως κριτήριο ταξινόμησης η διαφορά δακτυλίων (ring difference) $ring_2 - ring_1$ και η αξονική θέση $ring_2 + ring_1$

```
for RingDifference = 0,+1,-1,+2,-2,...,+31,-31
  for AxialPosition = |RingDifference|; AxialPosition <= 62-
|RingDifference|; AxialPosition += 2
    ring_1 = (AxialPosition - RingDifference)/2
    ring_2 = RingDifference + (AxialPosition - RingDifference)/2
    Write Sinogram(ring_1;ring_2)
```

Επιπλέον της μονάδας sinogram, υπάρχει και η δυνατότητα μετατροπής του δισδιάστατου ημιτονογράμματος σε ένα ecats7 καθορισμένο ημιτονογράμμα με την βοήθεια της μονάδας εξόδου ecats. Το τρισδιάστατο πλέον ημιτονογράμμα αποθηκεύεται σε ένα αρχείο μήτρας.

3.11.3 Τύπος εξόδου ECAT7

Εάν και μόνο εάν έχει επιλεγεί το προκαθορισμένο σύστημα ecats η μονάδα sinogram τότε η μονάδα εξόδου ecats7 θα ενεργοποιηθεί αυτόματα εκτός και εάν εισάγουμε

```
/gate/output/ecats7/disable
```

Αυτή η μονάδα γράφει το περιεχόμενο των δισδιάστατων ημιτονογραμμάτων που ορίστηκαν από την μονάδα του sinogram σε ένα ειδικά διαμορφωμένο αρχείο που αποτελείται από μήτρες και είναι ο χαρακτηριστικός τύπος αρχείου της CPS Innovations (Knoxville, TN, USA) για την οικογένεια των συστημάτων ECAT. Λόγω του μεγάλου μεγέθους ενός set δεδομένων από εξετάσεις full 3D PET, το μέγεθος των δεδομένων του set ελαττώνεται πριν γραφτεί σε δίσκο. Για αυτό δεν είναι δυνατό να πάμε πίσω, δηλαδή από ένα 3D sinogram διαμορφωμένο κατά ecats7 στο αντίστοιχο 2D sinogram από το οποίο προήλθε

Περιορισμός δεδομένων (data reduction)

Οι πολικές συντεταγμένες μιας LOR ορίζονται κατά προσέγγιση από την διαφορά των αριθμών καταχώρησης των δύο κρυσταλλικών δακτυλίων που συμμετείχαν στο coincidence. Σε ένα απεικονιστικό σύστημα με N_R κρυσταλλικούς δακτυλίους, ο συνολικός αριθμός πολικών δειγμάτων (polar samples) δίνεται από τον τύπο $2 \times N_R - 1$. Συνήθως, στα συστήματα ecats, δεν καταγράφονται όλες οι διαφορές κρυσταλλικών δακτυλίων (crystal ring differences). Συγκεκριμένα καταγράφονται μόνο οι απόλυτες διαφορές έως μια δεδομένη άνω

τιμή, που ονομάζεται μέγιστη διαφορά κρυσταλλικών δακτυλίων (maximum ring difference) και ορίζεται με την εντολή

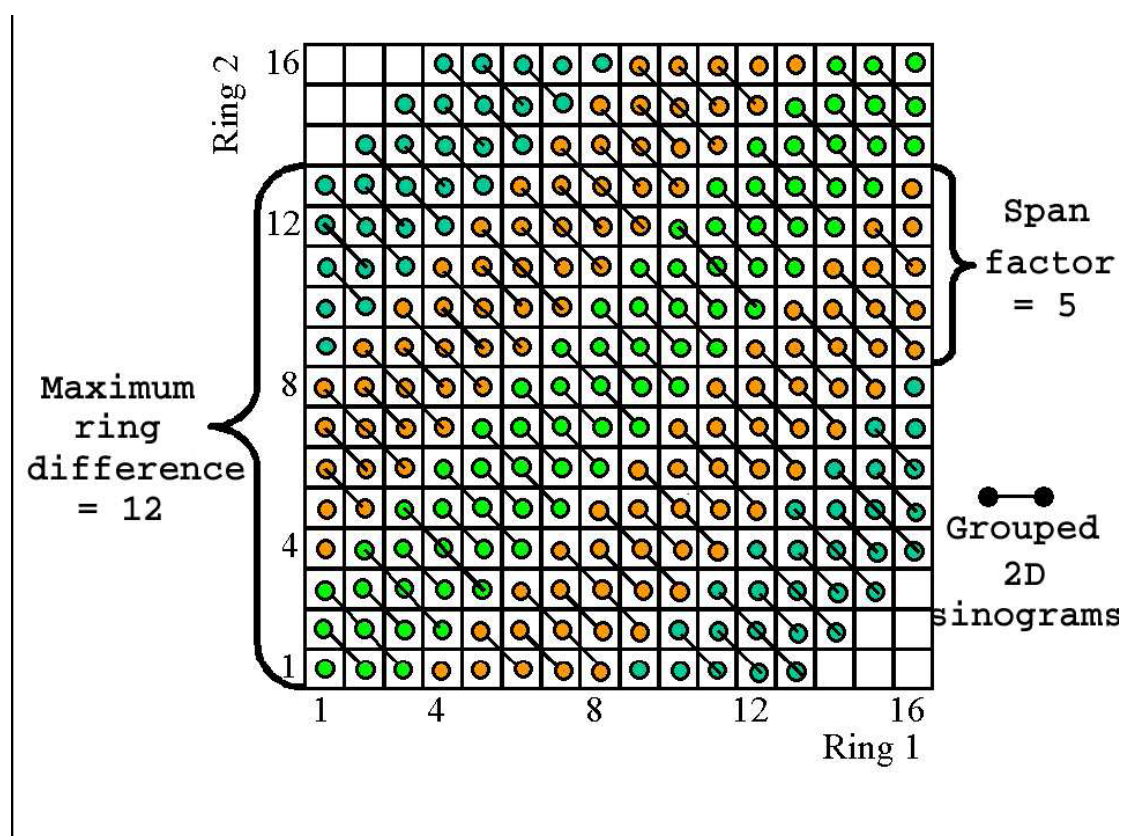
```
/gate/output/ecat7/maxringdiff 22
```

Η τιμή της μέγιστης διαφοράς κρυσταλλικών δακτυλίων θα πρέπει να είναι μικρότερη από το πλήθος N_R κρυσταλλικών δακτυλίων σε ένα σύστημα ecat.

Μια πολική δικτύωση/ομαδοποίηση (έχει επικρατήσει ο όρος polar mashing στην διεθνή βιβλιογραφία και αυτόν θα χρησιμοποιούμε στο εξής) εφαρμόζεται σε μια ομάδα από ημιτονογράμματα δύο διαστάσεων με γειτονικές πολικές συντεταγμένες. Το μέγεθος αυτής της ομάδας των 2D sinograms ονομάζεται εύρος (span). Η ελάχιστη τιμή του είναι ίση με 3 ενώ γενικά θα πρέπει να είναι περιττός ακέραιος αριθμός. Ορίζεται στην προσομοίωση με την εντολή

```
/gate/output/ecat7/span 9
```

Το γράφημα που παρουσιάζεται στην εικόνα 3.13 (Michelogram στην διεθνή βιβλιογραφία) παρουσιάζει γραφικά το mashing στις πολικές συντεταγμένες για ένα απεικονιστικό σύστημα 16 κρυσταλλικών δακτυλίων με μέγιστη διαφορά δακτυλίων ίση με 12 και με έναν παράγοντα span ίσο με 5. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όπως φαίνεται και στο γράφημα, να προκύπτουν 5 πολικά δείγματα αντί για 31. Ο περιορισμός του μεγέθους των δεδομένων είναι σημαντικός χωρίς να χάνεται σημαντική πληροφορία. Τα ομαδοποιημένα ημιτονογράμματα δύο διαστάσεων συνδέονται με διαγώνιες γραμμές.



Εικόνα 3.11 Γράφημα τύπου Michelogram για απεικονιστικό σύστημα 16 κρυσταλλικών δακτυλίων

Η προκαθορισμένη μέγιστη τιμή διαφοράς δακτυλίων είναι ίση με $N_R - 1$ και ο παράγοντας span ίσος με 3. Θα πρέπει στο σημείο αυτό να επισημάνουμε πως από την στιγμή που

επιλέξουμε μια μέγιστη τιμή διαφοράς δακτυλίων *MaxRingDiff* θα πρέπει να καθορίσουμε συγκεκριμένη τιμή για τον παράγοντα *span* έτσι ώστε ο συνολικός αριθμός πολικών δειγμάτων που δίνεται από την ακόλουθη σχέση να είναι ακέραιος.

$$\text{Number of Polar Samples} = \frac{2 \times \text{MaxRingDiff} + 1}{\text{span}}$$

Επιπλέον της εφαρμογής πολικού mashing, ο αριθμός των αζιμουθίων δειγμάτων (azimuthal samples) μπορεί επίσης να περιοριστεί από την τιμή $N_{azi} = \frac{N_{cryst}}{2}$ στην τιμή $\frac{N_{azi}}{m}$ όπου *m* είναι ο συντελεστής mashing. Για παράδειγμα εισάγουμε τη εντολή

```
/gate/output/ecat7/mashing 2
```

Η προκαθορισμένη τιμή mashing είναι ίση με 1.

Μετά το πέρας κάθε προσομοίωσης ένα νέο 3D ημιτονόγραμμα γράφεται οργανωμένο σε πλαίσια (frames) ανάλογα με το πλήθος των χρονικών τμημάτων στα οποία έχουμε διαιρέσει την συνολική χρονική διάρκεια του πειράματος της προσομοίωσης. Για παράδειγμα με την ακόλουθη ρύθμιση

```
/gate/application/setTimeSlice 60 s
/gate/application/setTimeStart 0 s
/gate/appication/setTimeStop 300 s
```

θα δημιουργηθούν 5 πλαίσια των 60 sec το καθένα. Το όνομα του αρχείου του ημιτονογράμματος καθορίζεται με την εντολή

```
/gate/output/ecat7/setFileName MySinogramFile
```

ενώ ο κώδικας ECAT του μοντέλου του απεικονιστικού συστήματος από την εντολή

```
/gate/output/ecat7/system 962
```

Αυτή η πληροφορία μπορεί να χρειαστεί από ορισμένους αλγόριθμους ανακατασκευής βασισμένους στο ecat7.

3.12 Ιδιότητες υλικών

3.12.1 Βάση δεδομένων υλικών

Η κύρια μέθοδος ορισμού των ιδιοτήτων των υλικών στο GATE αποτελεί η βάση δεδομένων υλικών (material database). Η βάση δεδομένων βρίσκεται στον κατάλογο `.../petsim` στο αρχείο *GateMaterials.db*. Αυτός ο φάκελος περιέχει όλες τις πληροφορίες που χρειάζονται στο GATE για να αναθέσει τις πυρηνικές ιδιότητες από τα σύνολα δεδομένων του Geant4. Το περιεχόμενο του μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί από τον χρήστη. Η OpenGATE Collaboration παρέχει μια αρκετά εκτεταμένη λίστα υλικών σε αυτό το αρχείο σαν τμήμα του συνολικού πακέτου προσομοίωσης του GATE. Σε αυτήν την παράγραφο θα περιγράψουμε τον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να τροποποιήσουμε αυτή τη βάση δεδομένων.

Υπάρχουν εναλλακτικές μέθοδοι ορισμού των υλικών. Όπως περιγράψαμε σε προηγούμενες παραγράφους, οι μακροεντολές στο GATE αναπτύχθηκαν με βάση συγκεκριμένες κλάσεις κατασκευασμένες σε C++ του Geant4 με στόχο την απλοποίηση και τυποποίηση των δεδομένων εισόδου στο Geant4. Επομένως ορισμοί υλικών μπορούν να γραφούν και να

μεταγλωττιστούν (compiled) κατευθείαν σε C++ χρησιμοποιώντας τα εργαλεία του Geant4. Ο ορισμός υλικών με αυτόν τον τρόπο δεν θα αναλυθεί στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις δυνατότητες της άμεσης πρόσβασης στον τρόπο ορισμού των υλικών από το Geant4 μπορούν να βρεθούν στα ακόλουθα εγχειρίδια χρήσης: "Geant4 User's Guide: For Application Developers" και " Geant4 User's Guide: For Toolkit Developers".

Το αρχείο *GateMaterials.db* περιέχει δύο δομές Geant4: τα στοιχεία (elements) και τα υλικά (materials). Και οι δύο δομές χρησιμοποιούνται για τον ορισμό των φυσικών αρχών των ατόμων, των μορίων και των μοριακών ενώσεων.

Στοιχεία (Elements)

Τα στοιχεία (elements) είναι οι δομικοί λίθοι όλων των υλικών (materials) που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις του GATE. Τα *elements* στο GATE ορίζονται όπως τα χημικά στοιχεία στον περιοδικό πίνακα. Το GATE αποθηκεύει το όνομα των στοιχείων, τον ατομικό τους αριθμό και το μοριακό τους βάρος. Ο φάκελος *GateMaterials.db* περιέχει τα στοιχεία με την ποιο διαδεδομένη χρήση και τα μοριακά τους βάρη όπως βρίσκονται στο φυσικό τους περιβάλλον.

Υλικά (Materials)

Στο GATE τα υλικά (materials) ορίζονται ως συνδυασμοί στοιχείων και αποτελούν μια πολύ σημαντική παράμετρο που χρησιμοποιεί το GATE για όλες τις αλληλεπιδράσεις σωματιδίων με αυτά τα υλικά κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτοί οι συνδυασμοί στοιχείων απαιτούν τον προσδιορισμό 4 επιπλέον παραμέτρων:

Όνομα υλικού, πυκνότητα, συστατικά στοιχεία και η ατομική συγκέντρωση κάθε ενός συστατικού στοιχείου.

Η σύνθεση των στοιχείων μέσα σε ένα υλικό μπορεί να οριστεί με δύο τρόπους:

Εάν το υλικό αποτελεί χημική μοριακή ένωση τότε η σχετική ποσότητα των χημικών στοιχείων που το αποτελούν μπορεί να προσδιοριστεί από τον αριθμό των ατόμων που εμφανίζονται στον τύπο της χημικής ένωσης. Έτσι για παράδειγμα το μεθάνιο CH_4 θα οριστεί ως ένα υλικό το οποίο διευθετεί ένα άτομο άνθρακα και 4 άτομα υδρογόνου.

Ένα όμως το υλικό περιγράφεται καλύτερα ως μείγμα, όπως το 304-ανοξείδωτο ατσάλι (304-stainless steel), τότε οι σχετικές ποσότητες των συστατικών στοιχείων προσδιορίζεται από το ποσοστό μοριακού βάρους κάθε στοιχείου επί του συνολικού μοριακού βάρους του υλικού. Στην περίπτωση του 304-ανοξείδωτου ατσάλιού τα ποσοστά μοριακού βάρους θα ήταν 0.695 Iron, 0.190 Chromium, 0.095 Nickel και 0.020 Manganese. Το άθροισμα των ποσοστών αυτών πρέπει να μας δίνει την μονάδα.

Οι πυκνότητες των υλικών συνήθως διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό ανάμεσα σε διαφορετικές πηγές. Επομένως πρέπει να γίνεται προσεκτική επιλογή τους ανάλογα με την εφαρμογή. Οι μονάδες πυκνότητας πρέπει επίσης να καθοριστούν. Συνήθως χρησιμοποιούμε g/cm^3 αλλά η επιλογή δεν είναι δεσμευτική.

3.12.2 Τροποποίηση της βάσης δεδομένων υλικών

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο η βάση δεδομένων υλικών του GATE βρίσκεται στο αρχείο *GateMaterials.db*. Το συγκεκριμένο αρχείο πρέπει να υπάρχει σε κάθε κατάλογο (directory) στον οποίον τρέχει το GATE εκτός εάν κατά την μεταγλώττιση του GATE καθορίστηκε κάποιος συγκεκριμένος κατάλογος που βρίσκεται το αρχείο αυτό έτσι ώστε να μπορεί να ανατρέξει κάθε φορά για την ανάγνωση του. Το σχετικό αρχείο είναι το

```
include/GateMaterialDatabase.hh
```

και η τροποποίηση της βάσης δεδομένων υλικών επιτυγχάνεται με μια εντολή της μορφής:

```
define DEFAULT_GATEMATERIALDB "the location of GateMaterials.db"
```

Το αρχείο της βάσης δεδομένων έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι εύκολη η τροποποίηση του από τον χρήστη. Το αρχείο αυτό θα πρέπει να περιέχει όλα τους ορισμούς των στοιχείων και των υλικών που σχετίζονται με το σύστημα που μοντελοποιείται.

Εισαγωγή νέου στοιχείου

Ο ορισμός ενός νέου στοιχείου είναι μια απλή και άμεση διαδικασία. Απλώς ανοίγουμε το αρχείο της βάσης *GateMaterials.db* με έναν επεξεργαστή κειμένου της επιλογής μας. Στην κορυφή του αρχείου υπάρχει μια επικεφαλίδα με όνομα [Elements] και κάπου στην μέση του αρχείου επίσης μια άλλη επικεφαλίδα με το όνομα [Materials]. Όλοι οι ορισμοί των στοιχείων που απαιτούνται από την προσομοίωση που εκτελούμε θα πρέπει να περιλαμβάνονται ανάμεσα σε αυτές τις επικεφαλίδες. Η σύνταξη που πρέπει να ακολουθηθεί για την εισαγωγή ενός νέου στοιχείου στην βάση αποτελείται από το όνομα του στοιχείου, το σύμβολό του, τον ατομικό του αριθμό και το μοριακό του βάρος. Ακολουθεί ένα παράδειγμα ορισμού:

```
[Elements]
Hydrogen:  S= H   ; Z=  1. ; A=  1.01  g/mole
Helium:    S= He  ; Z=  2. ; A=  4.003  g/mole
Lithium:   S= Li  ; Z=  3. ; A=  6.941  g/mole
Beryllium: S= Be  ; Z=  4. ; A=  9.012  g/mole
Boron:     S= B   ; Z=  5. ; A= 10.811  g/mole
Carbon:    S= C   ; Z=  6. ; A= 12.01   g/mole
```

Εισαγωγή νέου υλικού

Τα νέα υλικά ορίζονται με παρόμοιο τρόπο όπως και τα στοιχεία αλλά ο ορισμός τους περιέχει και επιπρόσθετες παραμέτρους που αφορούν την πυκνότητα και σύνθεση τους. Ο ορισμός της πυκνότητας είναι άμεσος και γίνεται με τον ίδιο τρόπο για κάθε υλικό. Όμως οι συνθέσεις των υλικών απαιτούν διαφορετικούς ορισμούς ανάλογα με το είδος της σύνθεσης. Τα είδη συνθέσεων υλικών είναι καθαρές ουσίες, χημικές ενώσεις και μείγμα στοιχείων.

Για την προσθήκη ή τροποποίηση ενός υλικού ανοίγουμε το αρχείο *GateMaterials.db* της βάσης δεδομένων με έναν επεξεργαστή κειμένου. Αυτή τη φορά η εισαγωγή των νέων δεδομένων γίνεται κάτω από την επικεφαλίδα [Materials]. Όλοι οι ορισμοί υλικών που χρησιμοποιούνται στη προσομοίωση πρέπει να συμπεριλαμβάνονται μετά την επικεφαλίδα αυτή. Οι ορισμοί υλικών εκτείνονται σε αρκετές γραμμές. Η πρώτη γραμμή καθορίζει όνομα, πυκνότητα, αριθμό συστατικών στοιχείων και μια προαιρετική παράμετρο που περιγράφει την φυσική κατάσταση του υλικού (αέρια (gas), υγρή (liquid) και στερεά (solid)). Η δεύτερη γραμμή καθορίζει το όνομα των στοιχείων που απαρτίζουν το υλικό καθώς και τις σχετικές ποσότητες τους που συμμετέχουν στη δημιουργία του υλικού.

Τα είδη σύνθεσης των υλικών στο GATE χωρίζονται σε τέσσερις (4) κατηγορίες:

Στα καθαρά στοιχεία, στις χημικές ενώσεις στοιχείων, στο μείγμα στοιχείων και στο μείγμα υλικών. Το GATE ορίζει ένα υλικό ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει και λίγο διαφορετικά. Για αυτόν τον λόγο θα αναφερθούμε ξεχωριστά για κάθε περίπτωση.

Στοιχεία θεωρούμενα ως υλικά

Ουσίες που αποτελούνται μόνο από ένα χημικό στοιχείο είναι η πιο εύκολη και απλή περίπτωση ορισμού υλικού. Στην πρώτη γραμμή εισάγουμε το όνομα του υλικού (μπορεί να είναι ίδιο με το όνομα του στοιχείου) , η πυκνότητά του. Ο αριθμός των στοιχείων που το αποτελούν και προαιρετικά η φυσική του κατάσταση. Η προκαθορισμένη φυσική κατάσταση είναι η αέρια (gas). Στην δεύτερη γραμμή εισάγουμε το όνομα του υλικού που απαρτίζει το

υλικό καθώς και το πλήθος των ατόμων του (στην περίπτωση αυτή ίσο με την μονάδα). Για παράδειγμα

```
[Materials]
Vacuum: d=0.000001 mg/cm3 ; n=1
        +el: name=Hydrogen ; n=1

Aluminium: d=1.350 g/cm3 ; n=1 ; state=solid
        +el: name=auto ; n=1

Uranium: d=18.90 g/cm3 ; n=1 ; state=solid
        +el: name=auto ; n=1
```

Η επιλογή `auto` εισάγεται όταν το όνομα του υλικού και του στοιχείου που το απαρτίζει είναι ίδια.

Χημικές ενώσεις ως υλικά

Υλικά τα οποία αποτελούνται από χημικές ενώσεις ορίζονται με βάση τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται. Η πρώτη γραμμή ταυτίζεται με την περίπτωση καθαρών ουσιών, εκτός από το γεγονός πως ο αριθμός των συστατικών στοιχείων είναι τώρα μεγαλύτερος της μονάδας. Στην δεύτερη γραμμή ορίζονται τα ανεξάρτητα χημικά στοιχεία και το πλήθος των ατόμων τους, με τον οποίο συμμετέχουν στην δημιουργία του υλικού. Για παράδειγμα

```
[Materials]
NaI: d=3.67 g/cm3; n=2; state=solid
    +el: name=Sodium ; n=1
    +el: name=Iodine ; n=1

PW0: d=8.28 g/cm3; n=3 ; state=Solid
    +el: name=Lead; n=1
    +el: name=Tungsten; n=1
    +el: name=Oxygen; n=4
```

Μείγματα στοιχείων

Ουσίες οι οποίες αποτελούνται από μείγμα στοιχείων προσδιορίζονται μέσω του καθορισμού του ποσοστού της ποσότητας με την οποία συμμετέχουν στο τελικό μείγμα. Η πρώτη γραμμή σε αυτή τη περίπτωση ταυτίζεται με την πρώτη γραμμή στην περίπτωση του ορισμού ενός υλικού ως χημική ένωση. Στην δεύτερη γραμμή τα ονόματα των αντιστοιχών στοιχείων και του ποσοστού συμμετοχής στο τελικό μείγμα καθορίζονται από τις παραμέτρους `+el: name= name of element` και `f= mass fraction` αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται ότι το άθροισμα των παραγόντων `f` θα πρέπει να είναι ίσο με την μονάδα. Ακολουθεί ένα παράδειγμα

```
[Materials]
Lung: d=0.26 g/cm3 ; n=9
    +el: name=Hydrogen ; f=0.103
    +el: name=Carbon ; f=0.105
    +el: name=Nitrogen ; f=0.031
    +el: name=Oxygen ; f=0.749
    +el: name=Sodium ; f=0.002
    +el: name=Phosphor ; f=0.002
    +el: name=Sulfur ; f=0.003
    +el: name=Chlorine ; f=0.003
    +el: name=Potassium ; f=0.002

SS304: d=7.92 g/cm3 ; n=4 ; state=solid
```

```

+el: name=Iron      ; f=0.695
+el: name=Chromium  ; f=0.190
+el: name=Nickel    ; f=0.095
+el: name=Manganese ; f=0.020

```

Μείγμα υλικών

Ένας εναλλακτικός τρόπος ορισμού του υλικού είναι σαν μείγμα στοιχείων και άλλων υλικών. Για παράδειγμα το υλικό Aerogel θα οριστεί ως εξής

```

[Materials]
Aerogel: d=0.200 g/cm3 ; n=3
+mat: name=SiO2      ; f=0.625
+mat: name=Water     ; f=0.374
+el:  name=Carbon    ; f=0.001

```

Στο παραπάνω παράδειγμα το υλικό Aerogel ορίζεται ως ένα υλικό το οποίο αποτελείται από δύο άλλα υλικά (το διοξείδιο του πυριτίου και το νερό) καθώς και από το στοιχείο του άνθρακα. Ο προσδιορισμός του υλικού πραγματοποιείται μέσω του καθορισμού του ποσοστού συγκέντρωσης των ποσοτήτων που αποτελούν το μείγμα του Aerogel. Επισημαίνεται πως όταν καθορίζουμε υλικά ως συστατικά άλλων υλικών τότε χρησιμοποιούμε την εντολή +mat: name= identifier .

Κεφάλαιο 4

Προσομοίωση του απεικονιστικού συστήματος ECAT EXACT HR+ με χρήση του GATE



4.1 Γενική αρχιτεκτονική προσομοίωσης

Όπως περιγράψαμε και στην παράγραφο 3.3 του προηγούμενου κεφαλαίου υπάρχει μια διατεταγμένη σειρά βημάτων που συνθέτουν μια ολοκληρωμένη ορθή αρχιτεκτονική προσομοίωσης στο GATE. Υπενθυμίζουμε στο σημείο αυτό την διάταξη των βημάτων που θα ακολουθήσουμε για την προσομοίωση του απεικονιστικού συστήματος τομογραφίας εκπομπής ποζιτρονίων ECAT EXACT HR+ της εταιρείας CPS Innovations. Συγκεκριμένα θα πρέπει

- 1) να ορίσουμε την γεωμετρία της ανιχνευτικής διάταξης
- 2) να ορίσουμε την γεωμετρία του phantom
- 3) να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους των φυσικών διαδικασιών
- 4) να αρχικοποιήσουμε την προσομοίωση
- 5) να καθορίσουμε το σύστημα ανίχνευσης
- 6) να ορίσουμε την(τις) πηγή(πηγές)
- 7) να επιλέξουμε την μορφή των δεδομένων εξόδου
- 8) να ξεκινήσουμε την συλλογή δεδομένων

Τα βήματα 1 έως 4 αφορούν την αρχικοποίηση της προσομοίωσης (Λειτουργία αρχικοποίησης, `PreInit> mode`). Μετά την αρχικοποίηση ακολουθούν τα βήματα 5-8 (`IDLE> mode`) στα οποία η γεωμετρία δεν μπορεί πλέον να μεταβληθεί. Στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούμε συνοπτικά σε καθένα από τα βήματα αυτά.

4.2 Λεπτομέρεια και οπτικοποίηση

4.2.1 Λεπτομέρεια (*verbosity*) εκτέλεσης της προσομοίωσης

Με τον όρο λεπτομέρεια εκτέλεσης μιας προσομοίωσης εννοούμε τόσο τον βαθμό ανάλυσης των δεδομένων της προσομοίωσης από το πρόγραμμα όσο και τον βαθμό πληροφόρησης και ενημέρωσης του χρήστη κατά την διάρκεια και στο τέλος της εκτέλεσης σχετικά με τις διαδικασίες που επιτελούνται μια δεδομένη στιγμή καθώς επίσης και σχετικά με την επίδοση της προσομοίωσης συνολικά. Η παράμετρος που διαθέτει το GATE για να ρυθμίσουμε πόσο «σχολαστικό» και «λεπτομερές» θα είναι κατά την προσομοίωση ενός πειράματος ονομάζεται *verbosity* και αυτόν τον όρο θα χρησιμοποιούμε στην συνέχεια.

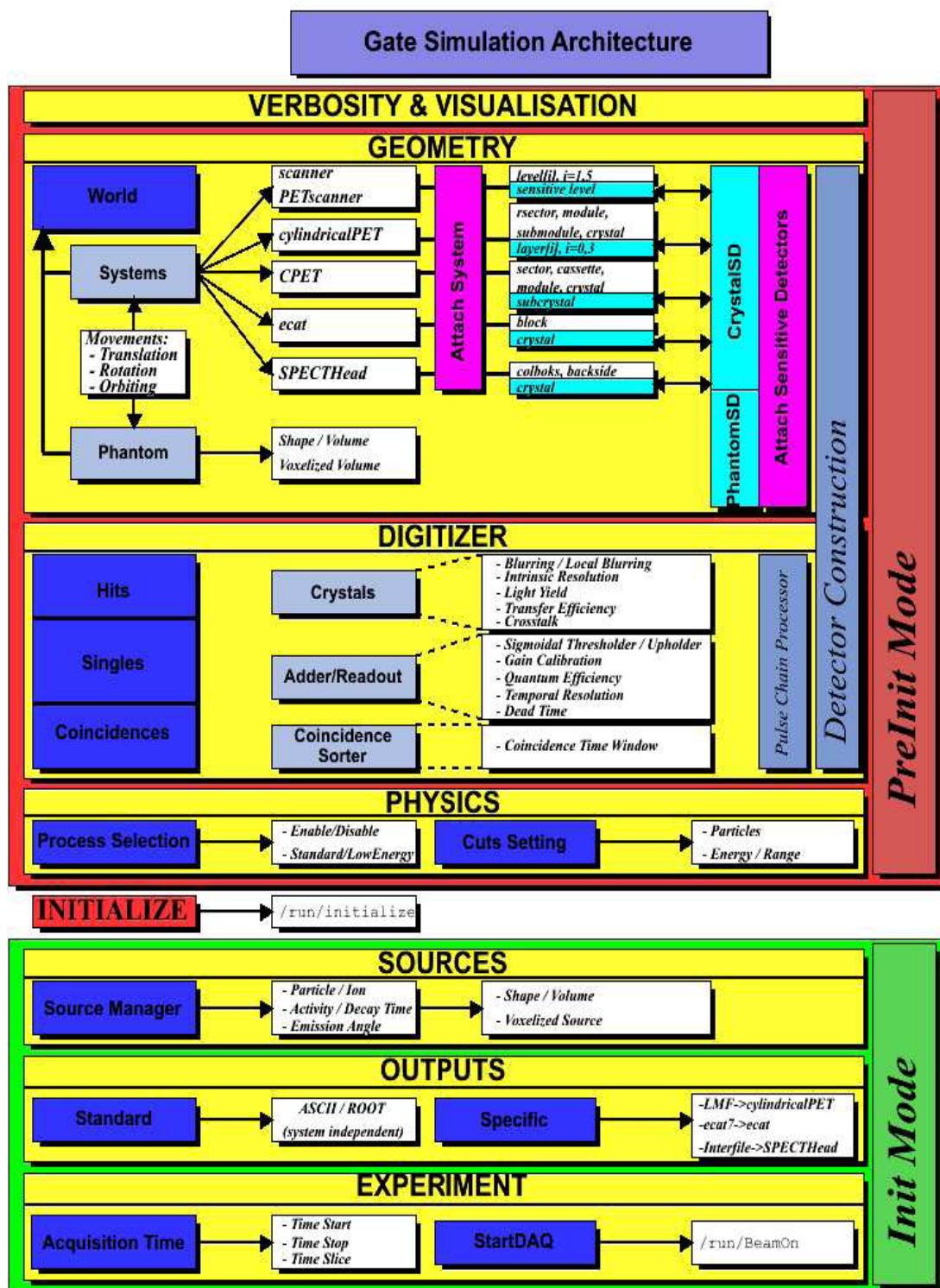
Για κάθε μονάδα προσομοίωσης το επίπεδο του *verbosity* μπορεί να ρυθμιστεί μεταξύ 0 και 2. Όσο πιο υψηλή είναι η τιμή τόσο υψηλότερος θα είναι και ο βαθμός της πληροφορίας που θα επιτρέψει το GATE στον χρήστη. Η προκαθορισμένη τιμή είναι η μηδενική, αλλά εάν κρίνεται απαραίτητη η λεπτομερής παρακολούθηση κάθε σταδίου της προσομοίωσης μπορεί να ρυθμιστεί η τιμή του *verbosity* σε υψηλότερα επίπεδα. Για παράδειγμα, για να εμφανιστεί στην οθόνη στο τέλος της προσομοίωσης ο συνολικός υπολογιστικός χρόνος που χρειάστηκε το GATE όπως παρακάτω

```
User simulation time (sec)    := 13.9
Real simulation time (sec)    := 15.92
System simulation time (sec) := 0.03
```

θα πρέπει να ρυθμίζουμε το επίπεδο του *verbosity* της εξόδου στην τιμή 2. Στο σημείο αυτό επισημαίνουμε πως σε ορισμένες περιπτώσεις υψηλό επίπεδο *verbosity* συνεπάγεται και κόστος στον υπολογιστικό χρόνο εκτέλεσης του GATE.

4.2.2 Οπτικοποίηση (*Visualization*)

Όπως αναπτύχθηκε στην παράγραφο 3.4 του προηγούμενου κεφαλαίου το GATE διαθέτει πολλά εργαλεία για οπτικοποίηση (**OpenGL**, **VRML**, **DAWN**...). Κάθε ένα εργαλείο μπορεί να ενεργοποιηθεί ανάλογα με τις επιλογές οπτικοποίησης που επιλέχθηκαν κατά την εγκατάσταση και ρύθμιση του προγράμματος του Geant4. Η on-line οπτικοποίηση είναι πολύ χρήσιμη όταν αναπτύσσονται καινούργιες γεωμετρίες. Επιτρέπει τον άμεσο οπτικό έλεγχο της γεωμετρίας του απεικονιστικού συστήματος την ίδια στιγμή που κατασκευάζεται. Έτσι για παράδειγμα ελέγχονται οι τοποθετήσεις των αντικειμένων, το σχήμα και οι διαστάσεις τους σε σχέση με τα μητρικά και τα *daughter* αντικείμενά τους όπως επίσης και οι πιθανές επικαλύψεις τους με γειτονικά αντικείμενα (*overlapping*). Από την στιγμή που θα ολοκληρωθεί ο έλεγχος της γεωμετρίας και θα προχωρήσουμε στην εκτέλεση της πλήρους προσομοίωσης συνίσταται να απενεργοποιήσουμε την επιλογή της on-line *visualization* για να μην επιβαρύνουμε χωρίς λόγο την μονάδα επεξεργασίας και να επιταχύνουμε την προσομοίωση.



Εικόνα 4.1 : Γενική αρχιτεκτονική προσομοίωσης στο GATE

4.2.3 Τυχαίοι αριθμοί στο GATE (Random)

Στο GATE κάθε χρονικό τμήμα (time slice) θεωρείται σαν μια αυτόνομη εκτέλεση (*run*). Η εντολή

```
/random/setSavingFlag 1
```

ενεργοποιεί την εγγραφή των αρχείων *currentRun.mdm* και *currenEvent.mdm* στα οποία αποθηκεύεται η κατάσταση τυχαίων αριθμών (*randomNumberStatus*) στην αρχή της εκτέλεσης και στην αρχή του συμβάντος (*event*) αντίστοιχα. Στην περίπτωση που έχουμε χωρίσει την προσομοίωση σε περισσότερα από ένα χρονικά τμήματα το αρχείο *CurrentRun.mdm* θα περιέχει την κατάσταση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών στην έναρξη του τελευταίου χρονικού τμήματος. Ο προκαθορισμένος κατάλογος (*directory*) στον οποίο εγγράφονται τα αρχεία *currentRun.mdm* και *currentEvent.mdm* είναι ο *./* εκτός εάν καθοριστεί διαφορετικός σύμφωνα με την εντολή

```
/random/setDirectoryName
```

Η εντολή

```
/random/resetEngineFrom
```

επιτρέπει την ρύθμιση εκ νέου (*reset*) της τυχαίας γεννήτριας από ένα αρχείο κατάστασης. Το προκαθορισμένο αρχείο κατάστασης είναι το *currentRun.mdm*. Με αυτόν τον τρόπο όμως ρυθμίζεται εκ νέου η κατάσταση της τυχαίας γεννήτριας με βάση την κατάσταση στην οποία βρισκόταν στην έναρξη της τελευταίας εκτέλεσης (δηλ. του τελευταίου χρονικού τμήματος) όπως εξηγήθηκε προηγουμένως.

Η εντολή

```
/gate/output/root/setSaveRndmFlag
```

επιτρέπει την εγγραφή των αρχείων *beginOfRun.mdm* και *endOfRun.mdm*. Η προκαθορισμένη τιμή της παραμέτρου *setSaveRndmFlag* είναι 1 και τότε τα δύο αυτά αρχεία θα δημιουργηθούν αυτόματα. Επιπλέον αυτή η σημαία (*flag*) ενεργοποιεί την αυτόματη αρχικοποίηση (*initialization*) μιας νέας εκτέλεσης με βάση την κατάσταση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών που είναι αποθηκευμένοι στο αρχείο *endOfRun.mdm* που υπάρχει στον κατάλογο. Αυτός ο μηχανισμός μας δίνει την δυνατότητα όταν εκτελούμε πολλές φορές ένα *macro* αρχείο στον ίδιο κατάλογο, να συλλέγουμε διαφορετικά *events*. Εάν έχει δοθεί επίσης και η εντολή

```
/random/setSavingFlag 1
```

τότε στο τελευταίο χρονικό τμήμα τα αρχεία *currentRun.mdm* και *beginOfRun.mdm* θα είναι ίδια και θα περιέχουν την κατάσταση της τυχαίας γεννήτριας πριν την γέννηση συμβάντων του τελευταίου χρονικού τμήματος, ενώ το αρχείο *endOfRun.mdm* θα περιέχει την κατάσταση της τυχαίας γεννήτριας μετά το τέλος του τελευταίου χρονικού τμήματος της προσομοίωσης.

4.3 Σύστημα *ecat*

4.3.1 Περιγραφή του συστήματος *ecat*

Το σύστημα *ecat* είναι μια απλοποιημένη έκδοση του *cylindricalPET* και ονομάστηκε *ecat* επειδή αποσκοπεί στην προσομοίωση της οικογένειας των απεικονιστικών συστημάτων ECAT από την CPS Innovations (Knoxville, TN, U.S.A.) .

Το *ecat* βασίζεται στην αρχή λειτουργίας του ανιχνευτή δομής block. Ένας block ανιχνευτής αποτελείται από έναν πίνακα από κρυστάλλους, συνήθως 8×8 , του οποίου το σήμα διαβάζεται στην συνέχεια από ορισμένους φωτοπολλαπλασιαστές (photomultiplier tubes – PMTs), συνήθως από τέσσερις (4). Τα blocks οργανώνονται σε δακτυλίους και έτσι προκύπτει μια ανιχνευτική διάταξη πολλαπλών δακτυλίων (multi-ring detector).

Στην συνέχεια θα μοντελοποιήσουμε την PET κάμερα ECAT EXACT HR+ επιλέγοντας να χρησιμοποιήσουμε ως βάση της προσομοίωσης μας στο GATE το προκαθορισμένο σύστημα *ecat*.

Το *ecat* σύστημα διαθέτει μόνο τρία επίπεδα ιεραρχίας: ένα οικουμενικό επίπεδο που περιλαμβάνει ολόκληρο τον ανιχνευτή και ονομάζεται *base*, ένα επίπεδο για το block που σχηματίζουν οι κρύσταλλοι και ονομάζεται *block* και τέλος το τρίτο επίπεδο για τους κρυστάλλους-ανιχνευτές που ονομάζεται *crystal*.

Εκτός από τις δύο τυπικές μονάδες εξόδου ASCII και ROOT, το σύστημα *ecat* υποστηρίζει δύο επιπλέον μονάδες που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για συγκεκριμένο σύστημα. Αυτές οι μονάδες ονομάζονται *sinogram* και *ecat7* μονάδες και περιγράφονται αναλυτικά στις παραγράφους 3.9.2 και 3.9.3 αντίστοιχα του προηγούμενου κεφαλαίου.

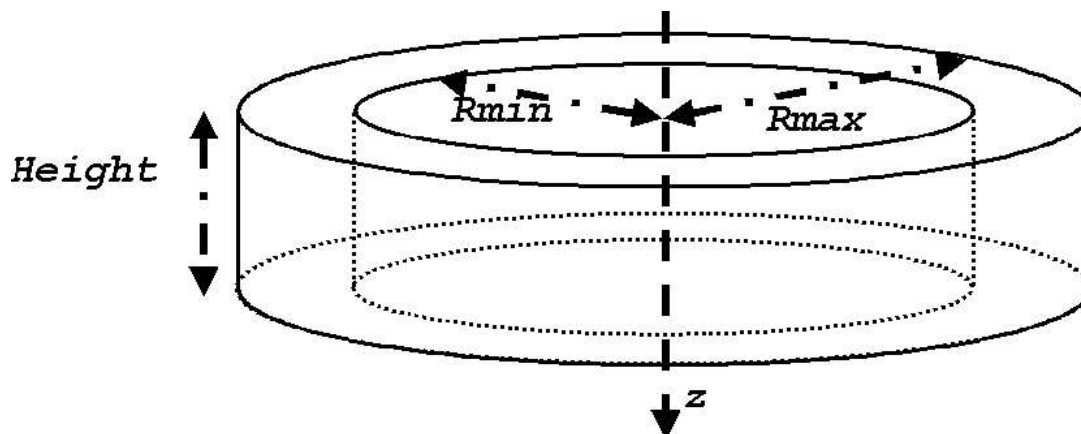
4.3.2 Εφαρμογή του συστήματος *ecat*

Στην συνέχεια περιγράφεται ο κώδικας που προσδιορίζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος *ecat* για την περίπτωση της προσομοίωσης του συστήματος ECAT EXACT HR+.

4.3.2.1 Περιγραφή του επιπέδου *base*

Το επίπεδο *base* είναι το ανώτερο επίπεδο του συστήματος *ecat* του GATE και για αυτό πρέπει να δηλωθεί στην προσομοίωση με το δεσμευμένο όνομα *ecat*. Αποτελεί το αντικείμενο daughter του world και στην ουσία δηλώνει ότι επιλέχθηκε το προκαθορισμένο σύστημα *ecat* ως βάση για την προσομοίωση. Το αντικείμενο *ecat* έχει σχήμα δακτυλιοειδούς κυλίνδρου και πρέπει να περιέχει όλους τους ανιχνευτές του συστήματος HR+.

```
/gate/world/daughters/name ecat  
/gate/world/daughters/insert cylinder  
/gate/ecat/setMaterial Air  
/gate/ecat/geometry/setRmax 49.2 cm  
/gate/ecat/geometry/setRmin 41.2 cm  
/gate/ecat/geometry/setHeight 15.7 cm
```

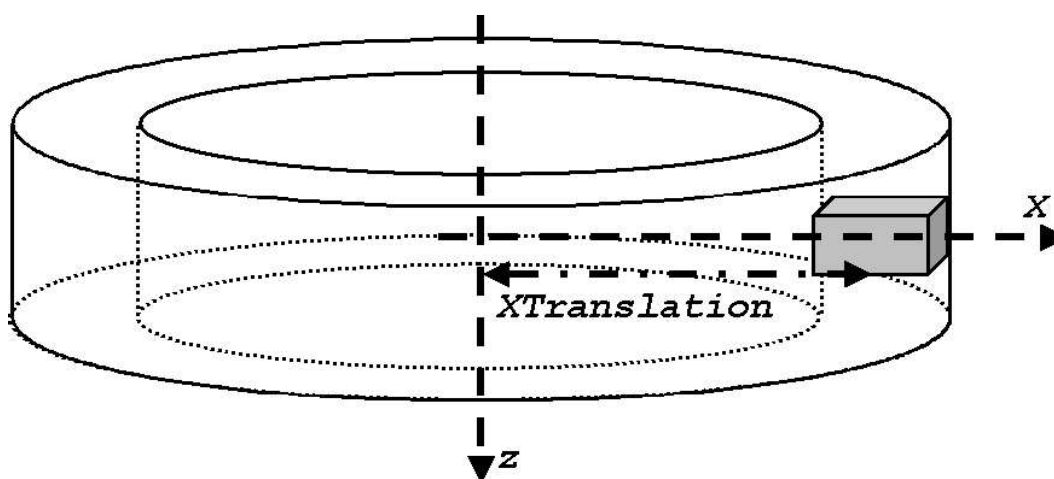


Εικόνα 4.2: Επίπεδο base του συστήματος ecat

4.3.2.2 Περιγραφή του επιπέδου block

Το επόμενο επίπεδο του συστήματος ονομάζεται *block* και σε αυτό καθορίζουμε το μέγεθος και την θέση του πρώτου block μέσα στο αμέσως ανώτερο επίπεδο *base* του *ecat*. Έχει σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου και πρέπει να περιέχει όλους ενός κρυστάλλους μέσα στο block. Στην περίπτωση ενός συστήματος πολλαπλών δακτυλίων από block κεντραρισμένο αξονικά, στην οποία ανήκει και το σύστημα HR+, η αξονική θέση του πρώτου block θα πρέπει να έχει μηδενική τιμή και να μην βρίσκεται στην άκρη του αντικείμενου *ecat*. Στην συνέχεια η επανάληψή του block κατά μια διεύθυνση κάθετη στην αξονική και εντός του αντικείμενου *ecat* θα σχηματίσει τα blocks των άλλων δακτυλίων.

```
/gate/ecat/daughters/name block
/gate/ecat/daughters/insert box
/gate/block/placement/setTranslation 445.0 0.0 0.0 mm
/gate/block/geometry/setXLength 80. mm
/gate/block/geometry/setYLength 35.942 mm
/gate/block/geometry/setZLength 38.29625 mm
/gate/block/setMaterial Air
```



Εικόνα 4.3 : Επίπεδο block του συστήματος ecat

4.3.2.3 Περιγραφή επιπέδου crystal

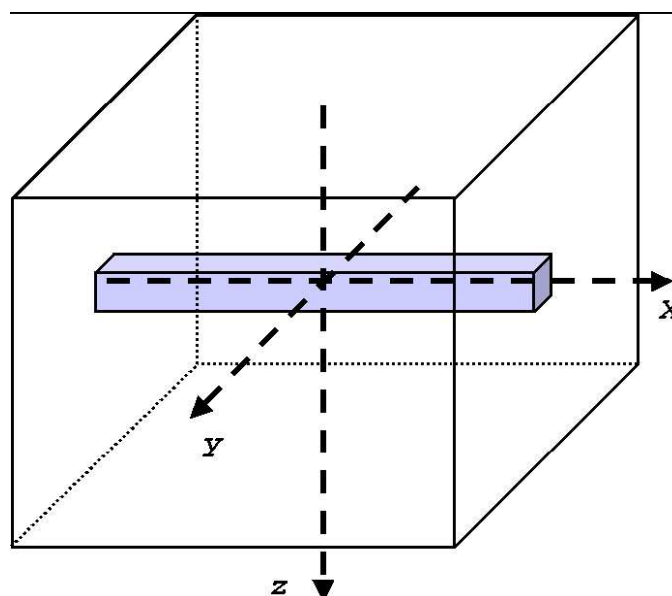
Στο τρίτο επίπεδο του συστήματος *ecat* που ονομάζεται *crystal* ρυθμίζουμε το μήκος και την θέση του πρώτου κρυστάλλου μέσα στο *block*. Στην περίπτωση που ο κρυσταλλικός πίνακας είναι κεντραρισμένος στο *block*, τότε θα πρέπει η θέση του πρώτου κρυστάλλου να βρίσκεται στο κέντρο του *block* και όχι στις άκρες του.

```
/gate/block/daughters/name crystal  
/gate/block/daughters/insert box  
/gate/crystal/geometry/setXLength 30.0 mm  
/gate/crystal/geometry/setYLength 4.05 mm  
/gate/crystal/geometry/setZLength 4.39 mm  
/gate/crystal/placement/setTranslation -25. 0. 0. mm  
/gate/crystal/setMaterial BGO
```

4.3.2.4 Περιγραφή του πίνακα κρυστάλλων

Για την δημιουργία ενός κρυσταλλικού πίνακα (*crystal array*) μέσα σε ένα *block* θα πρέπει να καθορίσουμε το μέγεθος του πίνακα και την απόσταση μεταξύ των στοιχείων του πίνακα δηλαδή μεταξύ των κρυστάλλων. Με την εφαρμογή ενός επαναλήπτη μητρικής διάταξης (*cubic array repeater*) θα προκύψει ένας κρυσταλλικός πίνακας κεντραρισμένος στην θέση του αρχικού κρυστάλλου. Για αυτόν τον λόγο επισημάνθηκε προηγουμένως ότι ο αρχικός κρύσταλλος θα πρέπει να βρίσκεται στο κέντρο του αντικειμένου *block*.

```
/gate/crystal/repeaters/insert cubicArray  
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatNumberX 1  
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatNumberY 8  
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatNumberZ 8  
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatVector 0. 4.4928 4.84375 mm
```



Εικόνα 4.4 : Επίπεδο *crystal* του συστήματος *ecat*

4.3.2.5 Περιγραφή των δακτυλίων από block

Για την δημιουργία των δακτυλίων από blocks (block rings) πρέπει να καθορίσουμε τον αριθμό των blocks ανά δακτύλιο καθώς επίσης και τον αριθμό των δακτυλίων. Συστήματα πολλαπλών δακτυλίων, όπως και το σύστημα HR+, θα κεντραριστούν αξονικά στην αξονική θέση του αρχικού block.

```
/gate/block/repeaters/insert linear
/gate/block/linear/setRepeatNumber 4
/gate/block/linear/setRepeatVector 0. 0. 38.75 mm
/gate/block/repeaters/insert ring
/gate/block/ring/setRepeatNumber 72
```

Η παραπάνω περιγραφή οδηγεί στην κατασκευή της βασικής γεωμετρίας της ανιχνευτικής διάταξης του συστήματος ECAT EXACT HR+ το οποίο αποτελείται από 4 δακτυλίου από 72 blocks ο καθένας. Επίσης κάθε block περιέχει $8 \times 8 = 64$ κρυστάλλους και επομένως συνολικά έχουμε 32 κρυσταλλικούς δακτυλίου (crystal ring) και 576 κρυστάλλους ανά κρυσταλλικό δακτύλιο. Τέλος από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως το σύστημα HR+ που προσομοιώσαμε διαθέτει συνολικά $576 \times 32 = 18432$ κρυστάλλους.

4.3.2.6 Σύνδεση αντικειμένων στο σύστημα

Η σύνδεση των αντικειμένων που αντιπροσωπεύουν το κρυσταλλικό block και τον ίδιο τον κρύσταλλο είναι απαραίτητο να συνδεθούν στα αντίστοιχα επίπεδα ιεραρχίας της γεωμετρικής αρχιτεκτονικής του συστήματος *ecat*. Έτσι τα αντικείμενα block συνδέονται με το επίπεδο *block* ενώ τα αντικείμενα crystal με το επίπεδο *crystal* του συστήματος *ecat* σύμφωνα με τις ακόλουθες εντολές

```
/gate/systems/ecat/block/attach block
/gate/systems/ecat/crystal/attach crystal
```

4.3.2.7 «Ευαίσθητοι» ανιχνευτές (sensitive detectors)

Επίσης είναι απαραίτητο να χαρακτηρίσουμε τους κρυστάλλους ως sensitive detectors κατά την διάρκεια της προσομοίωσής μας με την προϋπόθεση ότι προηγουμένως έχουν συνδεθεί στο σύστημα *ecat* με τις προηγούμενες εντολές. Για να ρυθμίσουμε την λειτουργία των κρυστάλλων ως λειτουργία sensitive detector εισάγουμε την ακόλουθη εντολή

```
/gate/crystal/attachCrystalSD
```

4.4 Βήμα προς βήμα υλοποίηση της προσομοίωσης

Μετά την περιγραφή της γενικής αρχιτεκτονικής των προσομοιώσεων στο GATE και των χαρακτηριστικών του προκαθορισμένου συστήματος *ecat* μπορούμε πλέον, με βάση όσα αναλυτικά αναπτύχθηκαν στο 3^ο Κεφάλαιο, να προχωρήσουμε στην παρουσίαση βήμα προς βήμα του συνόλου των μακροεντολών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της προσομοίωσης του απεικονιστικού συστήματος ECAT EXACT HR+ της CPS Innovations. Οι διαστάσεις και τα τεχνικά χαρακτηριστικά που θα εισάγουμε στην ακόλουθη προσομοίωση προέρχονται από το φυλλάδιο προδιαγραφών της Siemens Medical Solutions με την οποία συνεργάζεται η CPS Innovations για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου συστήματος της HR+.

4.4.1 Πρώτο βήμα: Οπτικοποίηση, Λεπτομέρεια και Ορισμός της Γεωμετρίας

Οι δυνατότητες οπτικοποίησης (visualization) και καθορισμού της λεπτομέρειας πληροφοριών (verbosity) κατά την διάρκεια μιας προσομοίωσης έχουν αναπτυχθεί στις παραγράφους 3.4 και 4.2 της εργασίας.

Οι πρώτες εντολές που συνήθως εισάγονται στο άμεσο περιβάλλον του GATE αφορούν την γραφική διεπαφή του χρήστη με το πρόγραμμα. Τα εργαλεία οπτικοποίησης που προσφέρονται είναι απαραίτητα εάν θέλουμε μια on-line πιστοποίηση ότι η γεωμετρία που κατασκευάζουμε είναι τελικά και εκείνη του πραγματικού συστήματος το οποίο επιχειρούμε να μοντελοποιήσουμε. Στην συνέχεια επιλέγουμε το εργαλείο του OpenGL StoredX για την οπτικοποίηση της γεωμετρίας της προσομοίωσης. Σε κάθε βήμα της κατασκευής της γεωμετρίας παρατίθεται και μια εικόνα έτσι ώστε να παρακολουθούμε βήμα προς βήμα την διαδικασία της γεωμετρικής κατασκευής της προσομοίωσης του συστήματος HR+.

```
#      V I S U A L I S A T I O N
/vis/open OGLSX
/vis/viewer/reset
/vis/drawView 45 45
/vis/viewer/zoom 4
/vis/viewer/set/style surface
/vis/drawVolume
/tracking/storeTrajectory 1
/vis/scene/endOfEventAction accumulate
/vis/viewer/update
/gate/geometry/enableAutoUpdate
```

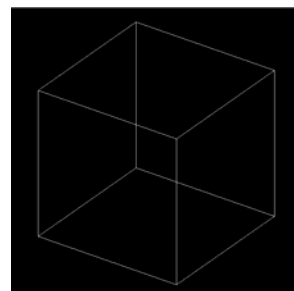
Τα διαφορετικά εργαλεία οπτικοποίησης και οι σχετικές εντολές αναλύθηκαν με περισσότερη λεπτομέρεια στην παράγραφο 3.4.

Μετά την ρύθμιση των επιλογών οπτικοποίησης ο χρήστης καλείται να ορίσει την γεωμετρία της προσομοίωσης με την βοήθεια αντικειμένων και συγκεκριμένων πράξεων που μπορούν να εφαρμοστούν σε καθένα από αυτά. Όπως εξηγήσαμε όλα τα αντικείμενα συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας μια δομή δένδρου όπου κάθε κλάδος αντιπροσωπεύει και ένα αντικείμενο. Κάθε αντικείμενο χαρακτηρίζεται από το σχήμα του, το μέγεθός του, την θέση του στον τρισδιάστατο χώρο του GATE και την σύνθεση του υλικού από το οποίο αποτελείται. Η βάση αυτής της δενδρικής δομής είναι το αντικείμενο *world* που αντιπροσωπεύει τον κόσμο του GATE και καθορίζει το πειραματικό πλαίσιο μέσα στο οποίο θα βρίσκεται η προσομοίωση. Όλες οι μακροεντολές που προορίζονται για τον ορισμό της γεωμετρίας στο GATE έχουν παρουσιαστεί στην παράγραφο 3.5.

Το αντικείμενο *world* έχει σχήμα κύβου και είναι συμμετρικό ως προς την αρχή των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων του GATE. Πρέπει α είναι μεγάλου μεγέθους έτσι ώστε να περιλαμβάνει ολόκληρη την γεωμετρική διάταξη της προσομοίωσης. Η καταγραφή της πορείας ενός σωματιδίου σταματάει μόλις αυτό φύγει εκτός των συνόρων του *world*. Στην προσομοίωση της HR+ ορίζουμε το αντικείμενο *world* να έχει μήκος ακμής 400. cm . Ο αντίστοιχος κώδικας καθώς και η εικόνα του *world* (εικόνα 4.5) ακολουθούν

```
#      W O R L D
/gate/world/geometry/setXLength 400. cm
/gate/world/geometry/setYLength 400. cm
/gate/world/geometry/setZLength 400. cm
```

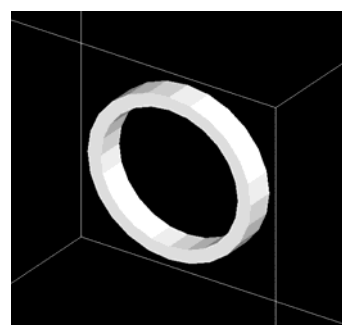
Το αντικείμενο *world* έχει ένα ή περισσότερα *daughter* αντικείμενα. Το πρώτο *daughter* αντικείμενο έχει ένα δεσμευμένο όνομα και αντιπροσωπεύει ένα από τα προκαθορισμένα συστήματα που διαθέτει το GATE.



Εικόνα 4.5: Το αντικείμενο *world*

Όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 4.3 για την προσομοίωση του συστήματος της HR+ επιλέγουμε το σύστημα *ecat* και καθορίζουμε τις βασικές διαστάσεις της ανιχνευτικής διάταξης σύμφωνα με τα επίσημα δεδομένα προδιαγραφών της Siemens Medical Solutions.

```
#      E C A T
/gate/world/daughters/name ecat
/gate/world/daughters/insert cylinder
/gate/ecat/setMaterial Air
/gate/ecat/geometry/setRmax 49.2 cm
/gate/ecat/geometry/setRmin 41.2 cm
/gate/ecat/geometry/setHeight 15.7 cm
/gate/ecat/vis/forceWireframe
```

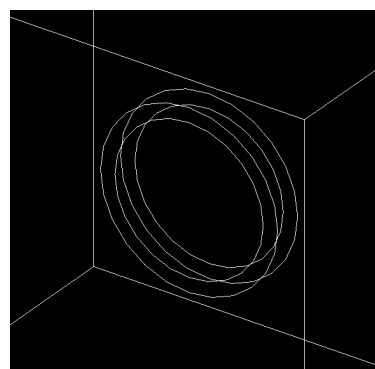


Εικόνα 4.6
Σύστημα *ecat* για την HR+

Στην εικόνα 4.6 παρουσιάζουμε την βασική δομή του συστήματος *ecat* χρησιμοποιώντας τις παραπάνω διαστάσεις.

Με την εφαρμογή της εντολής οπτικοποίησης *forceWireframe* (εικόνα 4.7) οπτικοποιείται μόνο το πλέγμα του κυλινδρικού σχήματος του *ecat* και έτσι το ίδιο το σύστημα καθίσταται διαφανές για να είναι ορατά και τα *daughter* αντικείμενα στην συνέχεια.

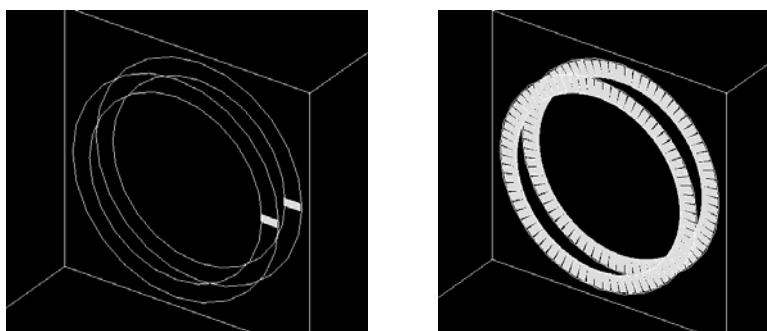
Όπως παρατηρούμε το υλικό από το οποίο αποτελείται το επίπεδο *base* του συστήματος *ecat* της κάμερας HR+ αποτελείται από αέρα. Στην συνέχεια τα αντικείμενα στο εσωτερικό θα αντικαταστήσουν τον αέρα με το δικό τους υλικό στον χώρο που καταλαμβάνουν.



Εικόνα 4.7
Σύστημα *ecat* για την HR+
σε *wireframe* μορφή

Το σύστημα της HR+ διαθέτει μια κυλινδρική ασπίδα από μόλυβδο που καλύπτει τα πλαϊνά τοιχώματα του δακτυλίου *ecat* με σκοπό να εμποδίσει την πιθανή έξοδο των σωματιδίων από την συγκεκριμένη πλευρά κατά την αλληλεπίδρασή τους με τους κρυστάλλους-ανιχνευτές και επομένως την ενδεχόμενη απώλεια δεδομένων. Ονομάζουμε την ασπίδα αυτή *endshielding* και κατασκευάζουμε την γεωμετρία της με διαδοχική εφαρμογή ενός γραμμικού (*linear*) και ενός δακτυλιοειδούς (*ring*) επαναλήπτη όπως φαίνεται στις εικόνες 4.8.

```
#      END-SHIELDING
/gate/ecat/daughters/name endshielding
/gate/ecat/daughters/insert box
/gate/endshielding/placement/setTranslation 445. 0.0 0.0 mm
/gate/endshielding/geometry/setXLength 80. mm
/gate/endshielding/geometry/setYLength 35.942 mm
/gate/endshielding/geometry/setZLength 1.0 mm
/gate/endshielding/setMaterial Lead
/gate/endshielding/vis/setColor white
/gate/endshielding/repeaters/insert cubicArray
/gate/endshielding/cubicArray/setRepeatNumberX 1
/gate/endshielding/cubicArray/setRepeatNumberY 1
/gate/endshielding/cubicArray/setRepeatNumberZ 2
/gate/endshielding/cubicArray/setRepeatVector 0.0 0.0 15.6 cm
/gate/endshielding/repeaters/insert ring
/gate/endshielding/ring/setRepeatNumber 72
```



Εικόνα 4.8 : Διαδοχική εφαρμογή γραμμικού (αριστερά) και δακτυλιοειδούς (δεξιά) επαναλήπτη για το *endshielding*

Ακολουθώντας προχωρούμε στην κατασκευή της γεωμετρικής διάταξης του δεύτερου ιεραρχικού επιπέδου του συστήματος *ecat* της HR+. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.3 το επίπεδο αυτό ονομάζεται *block* και αποτελεί την δομική μονάδα σύμφωνα με την οποία ομαδοποιούνται οι κρύσταλλοι ανιχνευτές κάθε *ecat* συστήματος. Στην περίπτωση της HR+ έχουμε 4 δακτυλίους όπου ο καθένας αποτελείται από 72 *block*.

Κάθε *block* θα έχει σχήμα κύβου και θα αποτελείται από υλικό αέρα. Θα πρέπει να βρίσκεται στο εσωτερικό του κυλίνδρου *ecat* και να είναι κεντραρισμένο ως προς τις διαστάσεις y και z του συστήματος συντεταγμένων του GATE. Το μήκος του κατά την z διεύθυνση πρέπει να είναι μικρότερο από το $1/4$ του ύψους του κυλίνδρου *ecat* (δηλ. μικρότερη από το $1/4$ του μήκους του κυλίνδρου *ecat* κατά την z διεύθυνση) ενώ το μήκος του κατά την x διεύθυνση πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο του πάχους του κυλίνδρου *ecat* κατά την ίδια διεύθυνση. Τέλος η διάστασή του κατά την διεύθυνση y θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε με την εφαρμογή ενός δακτυλιοειδούς επαναλήπτη 72 φορές να προκύψει ένας δακτύλιος που να περιλαμβάνεται εξ' ολοκλήρου στον κύλινδρο *ecat*. Με βάση τις παραπάνω προδιαγραφές και τις διαστάσεις των κυλίνδρων-ανιχνευτών υπολογίζουμε τις διαστάσεις των *blocks* καθώς και τα προβλεπόμενα κενά τόσο ανάμεσα στα *blocks* όσο και ανάμεσα στους κρυστάλλους-ανιχνευτές.

```
#      B L O C K
/gate/ecat/daughters/name block
/gate/ecat/daughters/insert box
/gate/block/placement/setTranslation 445.0 0.0 0.0 mm
/gate/block/geometry/setXLength 80. mm
/gate/block/geometry/setYLength 35.942 mm
```

```

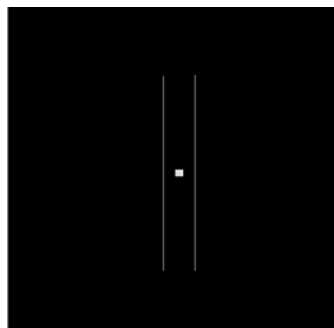
/gate/block/geometry/setZLength 38.29625 mm
/gate/block/setMaterial Air
/gate/block/vis/forceWireframe

```

Στην εικόνα 4.9 παρουσιάζεται το σύστημα του *ecat* μετά την δημιουργία του πρώτου *block* στο εσωτερικό του.

Για να είναι ευκρινής η κεντρική θέση του αρχικού *block* απεικονίζεται μια τομή του κυλινδρικού συστήματος *ecat* στο yz επίπεδο του GATE στο ύψος του άξονα x όπου βρίσκεται το αρχικό *block*.

Στην συνέχεια μεταβαίνουμε στο τρίτο επίπεδο της ιεραρχίας του συστήματος *ecat* το οποίο είναι το επίπεδο *crystal*. Το *daughter* αντικείμενο του *block* θα πρέπει να αποτελέσει την γεωμετρική δομή αναφοράς αυτού του επιπέδου.



Εικόνα 4.9

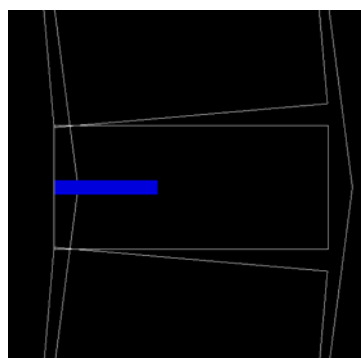
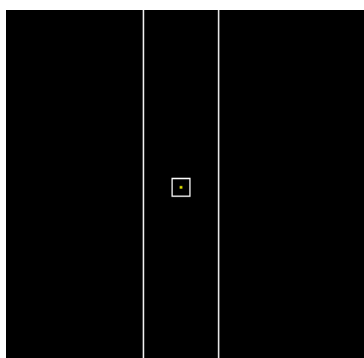
Αρχικό αντικείμενο block σε τομή στο yz επίπεδο

Το αντικείμενο αυτό ονομάζεται επίσης *crystal* και θα προσομοιώσει τους κρυστάλλους ανιχνευτές του απεικονιστικού συστήματος της HR+. Σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές της HR+ ο κάθε κρύσταλλος-ανιχνευτής έχει διαστάσεις $(x, y, z) = (30, 4.05, 4.39) \text{ mm}$ και αποτελείται από το υλικό BGO. Στο σχήμα 4.10 απεικονίζεται η δομή του αρχικού κρυστάλλου (*crystal*) και η σχετική θέση του ως προς την δομή του αρχικού *block*, στην οποία και περιέχεται πλήρως, σε δύο τομές επιπέδων. Στην εικόνα αριστερά φαίνεται μια τομή στο επίπεδο yz ενώ στην εικόνα δεξιά παρουσιάζεται η ίδια δομή σε τομή στο επίπεδο xy του συστήματος. Σε όλες τις περιπτώσεις τα αντικείμενα *block* και *endshielding* είναι διαφανή.

```

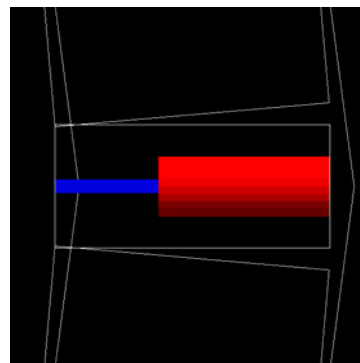
# C R Y S T A L
/gate/block/daughters/name crystal
/gate/block/daughters/insert box
/gate/crystal/geometry/setXLength 30.0 mm
/gate/crystal/geometry/setYLength 4.05 mm
/gate/crystal/geometry/setZLength 4.39 mm
/gate/crystal/placement/setTranslation -25. 0. 0. mm
/gate/crystal/setMaterial BGO
/gate/crystal/vis/setColor blue

```



Εικόνα 4.10 *Αρχικό αντικείμενο crystal στο εσωτερικό του αρχικού block σε τομή στο yz επίπεδο (αριστερά) και στο xy επίπεδο (δεξιά)*

Μετά τον ορισμό των κρυστάλλων-ανιχνευτών θα πρέπει να κατασκευάσουμε και τους φωτοπολλαπλασιαστές (Photomultiplier tubes -PMTs) του συστήματος της HR+, οι οποίοι τοποθετούνται ακριβώς πίσω από τους κρυστάλλους κατά μήκος της διεύθυνσης x του συστήματοςecat. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές οι φωτοπολλαπλασιαστές έχουν κυλινδρική μορφή και ξεκινούν μετά το πέρας των κρυστάλλων καταλήγοντας στην πίσω πλευρά του block, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.11 σε μια τομή του επιπέδου xy.



Εικόνα 4.11

*Αρχικός Φωτοπολλαπλασιαστής
σε τομή στο επίπεδο xy.*

```
# P H O T O M U L T I P L I E R   T U B E
/gate/block/daughters/name PMT
/gate/block/daughters/insert cylinder
/gate/PMT/geometry/setRmin 0. mm
/gate/PMT/geometry/setRmax 8.758625 mm
/gate/PMT/geometry/setHeight 50.0 mm
/gate/PMT/placement/setTranslation 15.0 0.0 0.0 mm
/gate/PMT/placement/alignToX
/gate/PMT/setMaterial Glass
/gate/PMT/vis/setColor red
```

Έως τώρα έχουμε ορίσει τις βασικές γεωμετρικές δομές του συστήματος. Τώρα θα πρέπει διαδοχικά να χρησιμοποιήσουμε επαναλήπτες για την ολοκλήρωση της κατασκευής της γεωμετρίας της ανιχνευτικής διάταξης της HR+.Η σειρά με την οποία θα εφαρμόσουμε κάθε διαδικασία επανάληψης είναι σημαντική και εάν δεν είναι ορθή μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Βασική αρχή της εφαρμογής επαναληπτικών διαδικασιών σε ένα σύστημα με πολλαπλά επίπεδα ιεραρχίας είναι η χρήση επαναληπτών, όπου απαιτείται, (repeaters) πρώτα όμως στα αντικείμενα του χαμηλότερου επιπέδου και στην συνέχεια διαδοχικά στα αντικείμενα του αμέσως υψηλότερου επιπέδου μέχρι να φτάσουμε στο *daughter* αντικείμενο του *world* που αντιπροσωπεύει και το σύστημα που επιλέξαμε

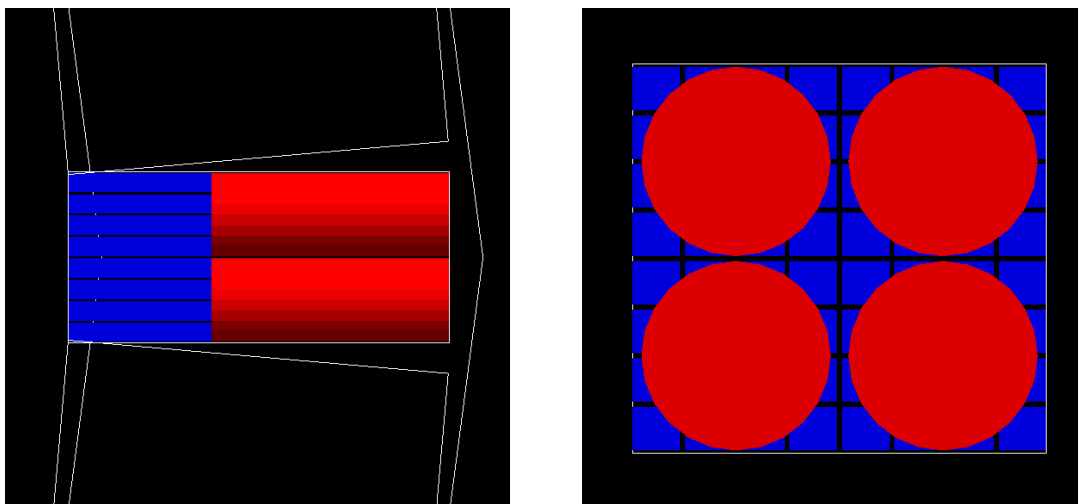
Συνεπώς ακολουθώντας αυτήν την αρχή σχεδιασμού προσομοιώσεων και στην περίπτωση της προσομοίωσης της HR+ αρχικά εφαρμόζουμε επαναληπτικές διαδικασίες στα αντικείμενα του επιπέδου *crystal* όπου κρίνεται αναγκαία. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της HR+ ένα block θα αποτελείται από μια τετραγωνική διάταξη $8 \times 8 = 64$ κρυστάλλων ανιχνευτών και επίσης από μια τετραγωνική διάταξη $2 \times 2 = 4$ φωτοπολλαπλασιαστών. Επομένως θα εφαρμόσουμε διαδοχικά δύο επαναλήπτες τετραγωνικής διάταξης (cubic array repeaters) πρώτα για τον κρύσταλλο και μετά για τον φωτοπολλαπλασιαστή του αρχικού block. Η κεντρική θέση και των δύο αρχικών αντικειμένων ως προς το αρχικό block εξασφαλίζει την παραμονή και των δύο νέων τετραγωνικών διατάξεων εντός των συνόρων του αντικειμένου block.

Επίσης και για τα δύο αντικείμενα η επανάληψη πραγματοποιείται κατά τις διευθύνσεις y και z του συστήματος.

Τα διαδοχικά αποτελέσματα της εφαρμογής αυτών των επαναληπτικών διαδικασιών φαίνονται στις εικόνες 4.12

```
# R E P E A T   C R Y S T A L
/gate/crystal/repeaters/insert cubicArray
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatNumberX 1
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatNumberY 8
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatNumberZ 8
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatVector 0. 4.4928 4.84375 mm
```

```
# R E P E A T   P M T   T U B E
/gate/PMT/repeaters/insert cubicArray
/gate/PMT/cubicArray/setRepeatNumberX 1
/gate/PMT/cubicArray/setRepeatNumberY 2
/gate/PMT/cubicArray/setRepeatNumberZ 2
/gate/PMT/cubicArray/setRepeatVector 0. 17.971 19.148125 mm
```

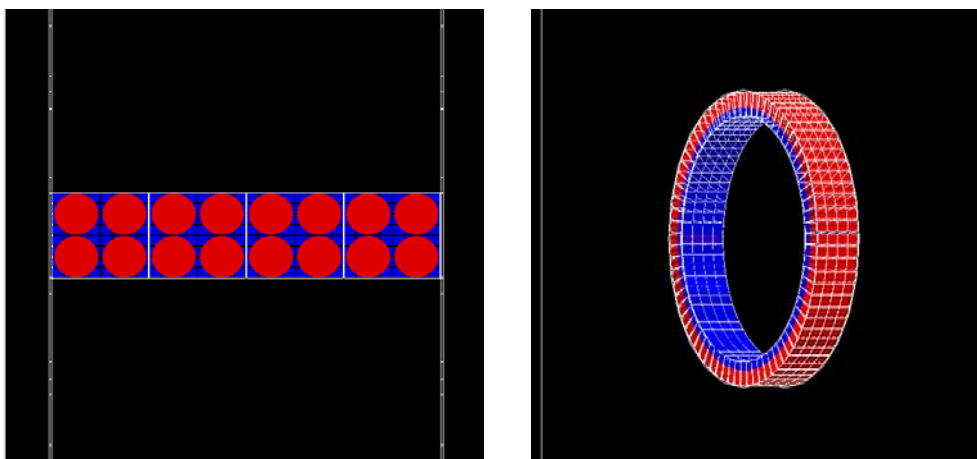


Εικόνα 4.12 : Αρχικό *block* με την διάταξη των 8×8 κρυστάλλων και των 2×2 φωτοπολλαπλασιαστών σε τομή στο επίπεδο xy (αριστερά) και στο επίπεδο yz (δεξιά)

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του αρχικού *block* από την επανάληψη των αντικειμένων του επιπέδου *crystal* εφαρμόζουμε τις επαναληπτικές διαδικασίες στα αντικείμενα του αμέσως υψηλότερου επιπέδου *block* για την ολοκλήρωση της κατασκευής της γεωμετρίας. Το αντικείμενο του επιπέδου *block* πάνω στο οποίο θα εφαρμόσουμε τις επόμενες επαναληπτικές διαδικασίες είναι το αρχικό *block* που δημιουργήθηκε στα προηγούμενα βήματα και φαίνεται στην εικόνα 4.9.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της HR+ η ανιχνευτική διάταξη διαθέτει 4 δακτυλίους από 72 *blocks* ο καθένας. Για να κατασκευάσουμε αυτούς τους δακτυλίους αρχικά εφαρμόζουμε έναν γραμμικό επαναλήπτη (*linear repeater*) στο αρχικό *block* κατά την διεύθυνση z του συστήματος επί 4 φορές. Η τετράδα των *blocks* που δημιουργείται απεικονίζεται στο σχήμα 4.13 (αριστερά) και καταλαμβάνει όλο το μήκος του κυλίνδρου *ecat* κατά την z διεύθυνση. Στην συνέχεια εφαρμόζεται σε αυτήν την τετράδα ένας δακτυλιοειδής επαναλήπτης (*ring repeater*) 72 φορές γύρω από τον άξονα συμμετρίας του κυλίνδρου *ecat* (άξονας z) με αποτέλεσμα την δημιουργία τεσσάρων δακτυλίων από 72 *blocks* ο καθένας (σχήμα 4.13 δεξιά).

```
# R E P E A T   B L O C K
/gate/block/repeaters/insert linear
/gate/block/linear/setRepeatNumber 4
/gate/block/linear/setRepeatVector 0. 0. 38.75 mm
/gate/block/repeaters/insert ring
/gate/block/ring/setRepeatNumber 72
```



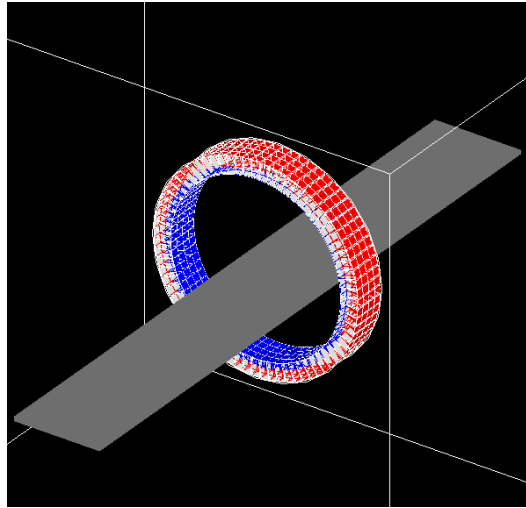
Εικόνα 4.13 Η τετράδα των blocks μετά την εφαρμογή του linear repeater (αριστερά) και η τετράδα των δακτυλίων μετά την εφαρμογή και του ring repeater (δεξιά).

Στις προηγούμενες εικόνες θεωρήσαμε τους δακτυλίους του endshielding διαφανής για να είναι πιο ευκρινείς οι προηγούμενες εικόνες των αντικειμένων της ανιχνευτικής διάταξης. Στις επόμενες εικόνες θα κάνουμε πάλι ορατή, κατά την οπτικοποίηση, την διάταξη του endshielding για να παρουσιάσουμε ολοκληρωμένη την γεωμετρία του συστήματος της HR+.

Ακολουθεί ο ορισμός του τραπεζιού εξέτασης (patient bed) το οποίο συμμετέχει στην διαμόρφωση των αποτελεσμάτων μιας πραγματικής εξέτασης καθώς ένα μικρό ποσοστό ακτινοβολούμενων σωματιδίων σκεδάζεται στα μόρια πλαστικού από τα οποία αποτελείται. Συνεπώς καθίσταται αναγκαία η προσομοίωσή του έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη και στα πειραματικά δεδομένα η συγκεκριμένη επίδραση του υλικού του τραπεζιού. Σημειώνεται ότι τόσο η επιλογή του υλικού όσο και του σχήματος και των διαστάσεων του τραπεζιού έγιναν με στόχο την όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση των προδιαγραφών που καθορίστηκαν από τους κατασκευαστές της HR+.

Στην εικόνα 4.14 απεικονίζεται η γεωμετρία του συστήματος ανίχνευσης μαζί με το εξεταστικό τραπέζι και τους δακτυλίους endshielding, δηλαδή η ολοκληρωμένη γεωμετρία του συστήματος τομογραφίας εκπομπής ποζιτρονίων ECAT EXACT HR+ της CPS Innovations.

```
# P A T I E N T B E D
/gate/world/daughters/name bed
/gate/world/daughters/insert box
/gate/bed/placement/setTranslation 0.0 -11.15 0.0 cm
/gate/bed/geometry/setXLength 41. cm
/gate/bed/geometry/setYLength 2. cm
/gate/bed/geometry/setZLength 284. cm
/gate/bed/setMaterial Plastic
/gate/bed/vis/setColor grey
```



Εικόνα 4.14: *Η γεωμετρία του συστήματος ECAT EXACT HR+*

Το επόμενο βήμα μετά τον ορισμό της γεωμετρίας του συστήματος ανίχνευσης αποτελεί η σύνδεση της γεωμετρίας με το σύστημα με σκοπό την αποθήκευση των δεδομένων των *hits* (δηλ. των αλληλεπιδράσεων των σωματιδίων) στο εσωτερικό των αντικειμένων που αντιπροσωπεύουν τους ανιχνευτές του συστήματος (sensitive detector ή φυσικό αντικείμενο). Το GATE, όπως έχουμε περιγράψει αποθηκεύει *hits* μόνο σε εκείνα τα αντικείμενα που έχουν συνδεθεί με έναν sensitive detector. Όλες οι αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μη-ευαίσθητα υλικά χάνονται. Όμως ένα αντικείμενο πρέπει να ανήκει σε ένα σύστημα πριν την σύνδεση του με έναν sensitive detector. Επομένως τα *hits* που συμβαίνουν σε ένα αντικείμενο δεν μπορούν να αποθηκευτούν σε ένα αρχείο εξόδου εάν το αντικείμενο αυτό δεν έχει συνδεθεί σε ένα σύστημα διότι τότε το αντικείμενο δεν μπορεί να συνδεθεί σε έναν sensitive detector. Οι αρχές των συστημάτων και των sensitive detector αναπτύχθηκαν στις παραγράφους 3.6 και 3.7 αντίστοιχα. Με τις επόμενες εντολές συνδέουμε τα αντικείμενα με το σύστημα *ecat*

```
#      A T T A C H      S Y S T E M
/gate/systems/ecat/block/attach block
/gate/systems/ecat/crystal/attach crystal
```

Τα ονόματα *block* και *crystal* είναι δεσμευμένα ονόματα και αντιστοιχούν στο πρώτο και στο δεύτερο επίπεδο του συστήματος *ecat* που διαθέτει το GATE.

4.4.2 Δεύτερο βήμα: Ορισμός της γεωμετρίας του phantom

Στην συνέχεια θα πρέπει να ορίσουμε το phantom που θα χρησιμοποιήσουμε για τα πειράματά μας. Η προσομοίωση ενός τομογραφικού συστήματος απεικόνισης, όπως είναι στην συγκεκριμένη περίπτωση το σύστημα της HR+, περιλαμβάνει εκτός από την περιγραφή των χαρακτηριστικών του συστήματος και την περιγραφή ενός πειράματος το οποίο θα πραγματοποιηθεί στο σύστημα αυτό και θα αξιολογήσει την επιτυχία της προσομοίωσης μετά από σύγκριση των δεδομένων της προσομοίωσης με τα πραγματικά πειραματικά δεδομένα κάτω από τις ίδιες πειραματικές συνθήκες. Επομένως είναι σημαντικό να περιγραφεί και να εισαχθεί με ακρίβεια στην προσομοίωση το πραγματικό πείραμα ώστε να πετύχουμε όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση πειραματικών συνθηκών γεγονός που αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη βέλτιστης προσέγγισης των πειραματικών αποτελεσμάτων από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Τα δύο βασικά στοιχεία τα οποία χαρακτηρίζουν ένα πείραμα είναι το phantom και η πηγή που θα επιλέγει. Τα χαρακτηριστικά του phantom που καθορίζουν κάθε φορά τις πειραματικές συνθήκες είναι το σχήμα, οι διαστάσεις και το υλικό του. Επίσης τα χαρακτηριστικά μιας πηγής που χαρακτηρίζουν ένα πείραμα είναι το σχήμα της, η διαστάσεις της, το είδος σωματιδίων που εκπέμπει, το ισότοπο με το οποίο είναι ιχνηθετημένη καθώς και η ενεργότητά της.

Το πρώτο βασικό στοιχείο μιας πειραματικής μας διάταξης αποτελεί το αντικείμενο phantom το οποίο περιέχει την πηγή ακτινοβολίας, αποτελείται από διάφορα υλικά και συμβάλλει στην σκέδαση ενός μεγάλου ποσοστού των ακτινοβολούμενων σωματιδίων. Ένα phantom μπορεί να είναι είτε αναλυτικής είτε διακριτοποιημένης (voxelised) μορφής. Στην περίπτωση του διακριτοποιημένου phantom κάθε voxel μπορεί να έχει κατασκευασθεί από διαφορετικό υλικό το καθένα με την δική του πυκνότητα.

Στην προσομοίωση της HR+ θα χρησιμοποιήσουμε ένα αναλυτικό phantom που ακολουθεί τις προδιαγραφές NEMA 2001 οι οποίες χρησιμοποιούνται σε πολλά πειράματα και προσομοιώσεις συστημάτων Πυρηνικής Ιατρικής. Επιλέξαμε ένα τυποποιημένο phantom διότι έτσι εξασφαλίζεται έως ένα βαθμό και η τυποποίηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και επομένως και η δυνατότητα σύγκρισης με πειράματα και προσομοιώσεις άλλων απεικονιστικών συστημάτων τομογραφίας εκπομπής.

Αποσκοπώντας στην αξιολόγηση (evaluation) και στην επικύρωση (validation) της προσομοίωσης του συστήματος HR+ αποφασίστηκε η προσομοίωση τεσσάρων πειραμάτων με την βοήθεια της μοντελοποιημένης κάμερας ECAT EXACT HR+.

Στα δύο πρώτα πειράματα χρησιμοποιούμε μια σημειακή πηγή (point source) μέσα σε ένα κυλινδρικό phantom NEMA 2001 με πλαστικά λεπτά τοιχώματα. Στο πρώτο πείραμα το phantom περιέχει αέρα, ενώ στην δεύτερη περίπτωση είναι γεμάτο με νερό. Στο τρίτο και στο τέταρτο πείραμα αντικαθιστούμε την σημειακή πηγή με μια γραμμική πηγή ίσης συνολικής ενεργότητας και η οποία είναι επίσης τοποθετημένη στο ίδιο κυλινδρικό phantom που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των δύο πρώτων πειραμάτων. Στο τρίτο πείραμα το εσωτερικό του πλαστικού phantom αποτελείται από αέρα ενώ στο τέταρτο πείραμα αποτελείται από νερό.

Στον ακόλουθο κώδικα με το όνομα phantomVol ορίζουμε το πλαστικό κυλινδρικό περίβλημα του phantom ενώ με το όνομα phantom το ίδιο το περιεχόμενο του phantomVol και το οποίο στα πειράματα 1 και 3 αποτελείται από αέρα ενώ στα πειράματα 2 και 4 από νερό. Το αντικείμενο phantomVol παραμένει αμετάβλητο και στα τέσσερα πειράματα.

Εκτός όμως από το κυλινδρικό phantom για να εισάγουμε αργότερα την πηγή πρέπει να ορίσουμε και δύο επιπλέον αντικείμενα που σχετίζονται με αυτή. Όπως γνωρίζουμε η πηγή ακτινοβολίας σωματιδίων σε ένα πείραμα Πυρηνικής Ιατρικής είναι συνήθως στην μορφή υδατικού διαλύματος. Το υδατικό διάλυμα τοποθετείται σε ένα ειδικό γυάλινο δοχείο με σχήμα και διαστάσεις ανάλογα με το είδος της πηγής. Το δοχείο αυτό το έχουμε προσομοιώσει παρακάτω με το αντικείμενο SrcVol το οποίο αποτελείται από γυαλί και έχει διαστάσεις που ακολουθούν επίσης τις προδιαγραφές NEMA 2001 όσον αφορά τις διαστάσεις σημειακών και γραμμικών πηγών. Στην συνέχεια ορίζουμε ως *daughter* αντικείμενο του SrcVol το αντικείμενο SrcF18 που αντιστοιχεί στο υδατικό διάλυμα της πηγής που θα επιλέξουμε στο τέλος της προσομοίωσης. Με δεδομένο ότι θα επιλέξουμε μια πηγή φθορίου-18 (F18) επιλέγουμε ένα όνομα που να υποδηλώνει το ισότοπο χωρίς όμως αυτό να είναι δεσμευτικό. Το αντικείμενο SrcF18 θα πρέπει να αποτελείται από νερό, να περιέχεται στο SrcVol και να φέρει ακριβώς τις διαστάσεις της πηγής που θα επιλέξουμε αργότερα. Με λίγα λόγια προσομοιώνει τον διαλύτη (νερό) στον οποίο θα διαλυθεί η ραδιενεργός ουσία (φθόριο-18). Το σχήμα και οι διαστάσεις των αντικειμένων SrcVol και SrcF18 εξαρτώνται μόνο από το είδος της πηγής (σημειακή ή γραμμική) που θα επιλέξουμε. Για λόγους ευκρίνειας έχουμε δηλώσει όλα τα παραπάνω αντικείμενα του phantom και της πηγής, εκτός από το SrcF18, ως διαφανή για να είναι ορατό το τελευταίο και να μπορούμε να εκτιμήσουμε οπτικά το σχήμα και το μέγεθος της σημειακής και γραμμικής πηγής.

Στην περίπτωση σημειακής πηγής ο κώδικας που περιγράφει τους ορισμούς των παραπάνω αντικειμένων θα είναι

```
#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#   D E F I N I T I O N   A N D   D E S C R I T I O N
#   O F   Y O U R   P H A N T O M   &   S O U R C E   V O L U M E S
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#
```

```
/gate/world/daughters/name phantomVol
/gate/world/daughters/insert cylinder
/gate/phantomVol/setMaterial Plastic
/gate/phantomVol/vis/forceWireframe
/gate/phantomVol/vis/setColor green
/gate/phantomVol/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/phantomVol/geometry/setRmax 10.15 cm
/gate/phantomVol/geometry/setHeight 80. cm
```

```
/gate/phantomVol/daughters/name phantom
/gate/phantomVol/daughters/insert cylinder
/gate/phantom/setMaterial Air
#/gate/phantom/setMaterial Water
/gate/phantom/vis/forceWireframe
/gate/phantom/vis/setColor blue
/gate/phantom/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/phantom/geometry/setRmax 10.0 cm
/gate/phantom/geometry/setHeight 77. cm
```

```
#   D E F I N E   S O U R C E   V O L U M E
/gate/phantom/daughters/name srcVol
/gate/phantom/daughters/insert cylinder
/gate/srcVol/setMaterial Glass
/gate/srcVol/vis/forceWireframe
/gate/srcVol/vis/setColor white
/gate/srcVol/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/srcVol/geometry/setRmax 0.6 mm
/gate/srcVol/geometry/setHeight 1.2 mm
```

```
#   D E F I N E   S O U R C E   S O L U T I O N
/gate/srcVol/daughters/name srcF18
/gate/srcVol/daughters/insert cylinder
/gate/srcF18/setMaterial Water
#/gate/srcF18/vis/forceWireframe
/gate/srcF18/vis/setColor blue
/gate/srcF18/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/srcF18/geometry/setRmax 0.5 mm
/gate/srcF18/geometry/setHeight 1. mm
```

Παρατηρούμε ότι αρκεί η αλλαγή μιας γραμμής εντολών για να περιγράψουμε τα αντικείμενα που συμμετέχουν στο δεύτερο πείραμα. Πρόκειται για την εντολή που καθορίζει το υλικό του αντικειμένου phantom. Έτσι αντί για αέρα τώρα το phantom θα πρέπει να αποτελείται από νερό.

```
/gate/phantom/setMaterial Water
```

Ακολουθούν οι αντίστοιχες γραμμές εντολών για τις συνθήκες του τρίτου πειράματος όπου έχουμε σημειακή πηγή στον αέρα.

```

#-----0000000000000000000000000000000000000000-----#
#                                                                 #
#   D E F I N I T I O N   A N D   D E S C R I T I O N           #
#   O F   Y O U R   P H A N T O M   &   S O U R C E   V O L U M E S   #
#                                                                 #
#-----0000000000000000000000000000000000000000-----#

/gate/world/daughters/name phantomVol
/gate/world/daughters/insert cylinder
/gate/phantomVol/setMaterial Plastic
/gate/phantomVol/vis/forceWireframe
/gate/phantomVol/vis/setColor green
/gate/phantomVol/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/phantomVol/geometry/setRmax 10.15 cm
/gate/phantomVol/geometry/setHeight 80. cm

/gate/phantomVol/daughters/name phantom
/gate/phantomVol/daughters/insert cylinder
/gate/phantom/setMaterial Air
#/gate/phantom/setMaterial Water
/gate/phantom/vis/forceWireframe
/gate/phantom/vis/setColor blue
/gate/phantom/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/phantom/geometry/setRmax 10.0 cm
/gate/phantom/geometry/setHeight 77. cm

#           D E F I N E   S O U R C E   V O L U M E
/gate/phantom/daughters/name srcVol
/gate/phantom/daughters/insert cylinder
/gate/srcVol/setMaterial Glass
/gate/srcVol/vis/forceWireframe
/gate/srcVol/vis/setColor white
/gate/srcVol/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/srcVol/geometry/setRmax 3. mm
/gate/srcVol/geometry/setHeight 76.1 cm

#           D E F I N E   S O U R C E   S O L U T I O N
/gate/srcVol/daughters/name srcF18
/gate/srcVol/daughters/insert cylinder
/gate/srcF18/setMaterial Water
#/gate/srcF18/vis/forceWireframe
/gate/srcF18/vis/setColor blue
/gate/srcF18/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/srcF18/geometry/setRmax 2.5 mm
/gate/srcF18/geometry/setHeight 76. cm

```

Όπως και στην περίπτωση της σημειακής πηγής έτσι και για την γραμμική πηγή, οι συνθήκες του τέταρτου πειράματος περιγράφονται από το παραπάνω σύνολο εντολών αρκεί να μεταβάλλουμε την εντολή που ορίζει το υλικό του αντικειμένου phantom σε:

```
/gate/phantom/setMaterial Water
```

4.4.3 Τρίτο βήμα: Σύνδεση γεωμετρίας με sensitive detectors

Τα αντικείμενα phantomVol και phantom που ορίστηκαν παραπάνω και για τα τέσσερα πειράματα αντιπροσωπεύουν το μέσο εξασθένησης (attenuation media) του phantom του πειράματος. Για να είναι δυνατή η συλλογή πληροφορίας σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις Compton και Rayleigh στο εσωτερικό του phantom, θα πρέπει να συσχετισθεί ένας sensitive detector με το αντικείμενο phantom που ορίσαμε προηγουμένως. Από το 3^ο κεφάλαιο

γνωρίζουμε πως στην περίπτωση αυτή συνδέουμε όλα τα αντικείμενα της γεωμετρίας στα οποία αναμένουμε αλληλεπιδράσεις Compton και Rayleigh με τον sensitive detector *phantomSD*. Στην περίπτωση της HR+ τα αντικείμενα αυτά είναι το phantom (κυρίως στα πειράματα 2 και 4 όπου περιέχει νερό, το εξεταστικό τραπέζι bed, οι φωτοπολλαπλασιαστές PMT και το πλαστικό περίβλημα *phantomVol*

Με την σύνδεση στο *phantomSD* θα καταγραφούν δύο είδη πληροφοριών για κάθε *hit*

- Ο αριθμός όλων των αλληλεπιδράσεων σκέδασης που πραγματοποιήθηκαν σε όλα τα φυσικά αντικείμενα που συνδέθηκαν στον *phantomSD*
- Το όνομα του φυσικού αντικειμένου το οποίο έχει συνδεθεί στο *phantomSD* και στο οποίο συνέβη η τελευταία αλληλεπίδραση

Επιπλέον για να αποθηκευτούν τα δεδομένα των *hits* σε κάθε αντικείμενο crystal που αντιπροσωπεύει έναν κρύσταλλο-ανιχνευτή του συστήματος θα πρέπει να συνδεθεί αυτό το αντικείμενο της γεωμετρίας με τον sensitive detector *CrystalSD*.

Οι παραπάνω συνδέσεις επιτυγχάνονται με τις εντολές

```
#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#           A T T A C H       P H A N T O M       S D       &
#           A T T A C H       C R Y S T A L       S D
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#
```

```
/gate/phantomVol/attachPhantomSD
/gate/phantom/attachPhantomSD
/gate/bed/attachPhantomSD
/gate/PMT/attachPhantomSD
/gate/endshielding/attachPhantomSD
/gate/crystal/attachCrystalSD
```

4.4.4 Τέταρτο βήμα: Ρύθμιση των φυσικών διαδικασιών

Μετά την σύνδεση των αντικειμένων της γεωμετρίας με το σύστημα και τους sensitive detectors ολοκληρώνεται το πρώτο μέρος της προσομοίωσης. Στο δεύτερο μέρος πρώτα από όλα πρέπει να οριστούν ποιες διαδικασίες φυσικών αλληλεπιδράσεων θα περιληφθούν στην προσομοίωση. Ο ορισμός των φυσικών διαδικασιών μπορεί να οργανωθεί στα παρακάτω τρία βασικά βήματα

- Καθορισμός του είδους των σωματιδίων μεταφοράς
- Καθορισμός των φυσικών διαδικασιών που θα ληφθούν υπόψη κατά την προσομοίωση
- Ρύθμιση των κατωφλίων παραγωγής

Το GATE χρησιμοποιεί τα μοντέλα του Geant4 για να προσομοιώσει φυσικές διαδικασίες. Ο χρήστης καλείται να επιλέξει ανάμεσα σε αυτές τις μοντελοποιημένες φυσικές διαδικασίες ανάλογα με το είδος του σωματιδίου που έχει επιλέξει στο πρώτο βήμα. Στην περίπτωση των φωτονίων, μπορούν να μοντελοποιηθούν τα φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (Photoelectric effect), η σκέδαση Compton και Rayleigh και η παραγωγή ζευγών (pair production). Στην περίπτωση των ηλεκτρονίων μπορούν να μοντελοποιηθούν οι διαδικασίες του ιονισμού (ionization), της σκέδασης Moller και της ακτινοβολίας Brem (Bremstrahlung). Τέλος στην περίπτωση της εξαύλωσης ποζιτρονίων με ηλεκτρόνια, μοντελοποιείται η έλλειψη συγραμικότητας του ζεύγους ακτίνων γάμμα (gamma pair non-collinearity).

Όπως περιγράψαμε και στο τρίτο κεφάλαιο, για κάθε τύπο αλληλεπίδρασης, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε δύο μοντέλα ή και να αγνοήσει την αλληλεπίδραση εντελώς ανάλογα με το ποια από τις επόμενες παραμέτρους επιλέξει:

- Standard: χρήση του τυπικού μοντέλου (μεταφορά φωτονίων και ηλεκτρονίων με κάτω ενεργειακό όριο τα 10keV, η σκέδαση Rayleigh δεν μοντελοποιείται)

- low-energy: χρήση του μοντέλου χαμηλών ενεργειών (μεταφορά φωτονίων και ηλεκτρονίων με κάτω ενεργειακό όριο τα 250eV, μοντελοποίηση της σκέδασης Rayleigh)
- inactive: η αλληλεπίδραση δεν προσομοιώνεται.

Οι προκαθορισμένες επιλογές για τις φυσικές διαδικασίες στο GATE είναι

- για σωματίδια γάμμα ακτινοβολίας, επιλέγονται μοντέλα χαμηλής ενέργειας για όλες τις διαδικασίες
- για σωματίδια ηλεκτρονίων χρησιμοποιούνται τα μοντέλα standard.

Στην προσομοίωση του συστήματος HR+, επειδή πρόκειται για σύστημα τομογραφίας εκπομπής ποζιτρονίων (PET) επιλέξαμε ακτινοβολία γάμμα επομένως και την παρακάτω λίστα μοντέλων φυσικών διαδικασιών

```
#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#   D E F I N I T I O N   A N D   D E S C R I T I O N
#           O F   Y O U R   P H Y S I C S
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#

#   E M   P R O C E S S
/gate/physics/gamma/selectRayleigh lowenergy
/gate/physics/gamma/selectPhotoelectric standard
/gate/physics/gamma/selectCompton standard
```

Επιπλέον το GATE επιτρέπει την ρύθμιση τριών ενεργειακών φίλτρων.

- Ζωνοπερατό φίλτρο για τα ηλεκτρόνια
- Ενεργειακό φίλτρο για ακτίνες X
- Ενεργειακό φίλτρο για ακτίνες δέλτα

Εάν επιθυμούμε αποτελέσματα με πολύ καλή ακρίβεια θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μόνο κάτω όρια στα ενεργειακά φίλτρα (ενεργειακά κατώφλια) ή ακόμα και να αποφεύγουμε τελείως την χρήση ορίων έτσι ώστε κάθε δευτερεύον σωματίδιο το οποίο παράγεται να μπορεί και να ανιχνευθεί. Στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα διαθέτουν μεγάλη ακρίβεια, όμως ο χρόνος εκτέλεσης της προσομοίωσης αυξάνει σημαντικά. Εάν επιθυμούμε γρήγορη προσομοίωση θα πρέπει να ρυθμίσουμε τις τιμές των κατωφλίων σε υψηλότερες ενεργειακές τιμές έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουμε τον χρόνο που απαιτείται για την ανίχνευση των δευτερευόντων σωματιδίων.

Για την δική μας προσομοίωση επιλέξαμε τις ακόλουθες ρυθμίσεις

```
#   I N A C T I V E   S E C O N D A R Y   E L E C T R O N S
/gate/physics/setElectronCut 1. m

#   I N A C T I V E   X - R A Y S
/gate/physics/setXRayCut 1. GeV
/gate/physics/setDeltaRayCut 1. GeV
```

Οι λεπτομέρειες των ρυθμίσεων στο GATE σχετικά με τις διαδικασίες φυσικών αλληλεπιδράσεων και ενεργειακών κατωφλίων περιγράφονται στην παράγραφο 3.8 του προηγούμενου κεφαλαίου.

4.4.5 Πέμπτο βήμα: Αρχικοποίηση

Όταν ρυθμιστούν όλα τα προηγούμενα βήματα, το οποίο αντιστοιχούν στην λειτουργία προ-αρχικοποίησης (*Prelimit Mode*) του Geant4, η προσομοίωση πρέπει να αρχικοποιηθεί με χρήση της επόμενης εντολής

```
#-----oooooooooooooooooooooooooooooooo-----#
#
#   I N I T I A L I Z A T I O N   O F   Y O U R
#               S I M U L A T I O N
#
#-----oooooooooooooooooooooooooooooooo-----#
```

`/run/initialize`

Η βασική επίδραση της αρχικοποίησης στην διαδικασία της προσομοίωσης είναι ο υπολογισμός των πινάκων διατομής (*cross section tables*) των φυσικών διαδικασιών. Μετά από το βήμα της αρχικοποίησης η λίστα των φυσικών διεργασιών δεν μπορεί να τροποποιηθεί πλέον και επιπλέον νέα αντικείμενα δεν μπορούν να εισαχθούν στην γεωμετρία.

Ένας πολύ σημαντικός έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί ακριβώς μετά το στάδιο της αρχικοποίησης με σκοπό να επιβεβαιωθεί πως δεν εντοπίζεται επικάλυψη (*overlapping*) μεταξύ αντικειμένων του ίδιου επιπέδου και πως ένα *daughter* αντικείμενο βρίσκεται στο εσωτερικό του μητρικού του αντικειμένου. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται μόνο μια φορά, αποσκοπεί στον έλεγχο της ορθότητας της γεωμετρίας της προσομοίωσης και επιτυγχάνεται με χρήση της εντολής

`/geometry/test/recursive_test`

4.4.6 Έκτο βήμα: Ρύθμιση του ψηφιοποιητή (*digitizer*)

Τα βασικά δεδομένα εξόδου του πακέτου λογισμικού προσομοίωσης GATE είναι μια συλλογή από *hits* στα οποία πληροφορία που αφορά θέση, χρόνο και ενέργεια κάθε *hit* αποθηκεύεται. Μέσω, λοιπόν, όλων των *hits* που παράγονται κατά μήκος της διαδρομής ενός σωματιδίου, η ιστορία κάθε ενός αποθηκεύεται στα δεδομένα εξόδου. Στόχος της μονάδας του ψηφιοποιητή (*digitizer*) είναι η κατασκευή φυσικά μετρούμενων ποσοτήτων από τις πληροφορίες των *hits* και η μοντελοποίηση συστημάτων ανάγνωσης δεδομένων όπως επίσης και υλοποίηση διαφόρων μεθόδων ενεργοποίησης και διέγερσης των ηλεκτρονικών αισθητήρων των συστημάτων απεικόνισης τομογραφίας εκπομπής. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων ομαδοποιούνται πολλές συναρτήσεις επεξεργασίας κάτω από την μονάδα *digitizer* του GATE. Για αυτόν τον λόγο η μονάδα του *digitizer* αποτελείται από πολλές διαφορετικές υπο-μονάδες επεξεργασίας και μπορεί να θεωρηθεί ως μια ευέλικτη γραμμική αλυσίδα μονάδων επεξεργασίας στην οποία μπορούν είτε να προστεθούν είτε να αφαιρεθούν μονάδες ανάλογα με την προσομοίωση.

Η περιγραφή της λειτουργίας του *digitizer* και κάθε μονάδας του ξεχωριστά πραγματοποιήθηκε στην παράγραφο 3.10 του τρίτου κεφαλαίου. Έτσι σε αυτή εδώ την παράγραφο θα περιοριστούμε στην περιγραφή των ρυθμίσεων του *digitizer* που επιλέξαμε για την προσομοίωση του συστήματος HR+.

Αρχικά επιλέγουμε την εισαγωγή της μονάδας του *adder* για την άθροιση των *hits* που παράγονται ανά στοιχειώδες αντικείμενο, το οποίο στην περίπτωση του μοντέλου της HR+ είναι το αντικείμενο *crystal* (δηλ. ο κρύσταλλος-ανιχνευτής).

```
#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
# D E F I N I T I O N   O F   Y O U R   A C Q U I S I T I O N   #
# D I G I T I Z E R   &   C O I N C I D E N C E   S H O R T E R   #
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#
```

```
# A D D E R
/gate/digitizer/Singles/insert adder
```

Η επόμενη μονάδα που εισάγουμε είναι η μονάδα *readout*. Η συγκεκριμένη μονάδα περιγράφει την μέθοδο συλλογής και ανάγνωσης δεδομένων (*readout scheme* όπως περιγράψαμε στο τρίτο κεφάλαιο). Εκτός από την περίπτωση όπου το σήμα κάθε κρυστάλλου διαβάζεται από έναν φωτοπολλαπλασιαστή, σε όλες τις άλλες περιπτώσεις η τμηματοποίηση της διαδικασίας ανάγνωσης δεδομένων μπορεί να διαφέρει από την γεωμετρική δομή του ανιχνευτή. Η γεωμετρία ανάγνωσης δεδομένων (*readout geometry*) είναι μια αφηρημένη γεωμετρία και συνήθως σχετίζεται με μια ομάδα από *sensitive detectors*. Στην περίπτωση της προσομοίωσης της HR+ έχουμε καθορίσει η ομάδα αυτή να είναι το αντικείμενο *block* στο οποίο ομαδοποιούνται $8 \times 8 = 64$ κρύσταλλοι.

```
# R E A D O U T
/gate/digitizer/Singles/insert readout
/gate/digitizer/Singles/readout/setDepth 1
```

Έτσι στην δική μας προσομοίωση, η μονάδα του *readout* αθροίζει την ενέργεια που εναποτίθεται σε όλους του κρυστάλλους κάθε *block* και καθορίζει την θέση του συμβάντος από την θέση του κρυστάλλου στον οποίο εναποτέθηκε η περισσότερη ενέργεια. (πολιτική χειρισμού συμβάντος: "winner takes all"). Οι διάφορες πολιτικές χειρισμού συμβάντων θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο με περισσότερη λεπτομέρεια.

Η εντολή που καθορίζει το επίπεδο της γεωμετρίας (για το οποίο χρησιμοποιήσαμε τον όρο βάθος - "depth"- στο προηγούμενο κεφάλαιο) στο οποίο εκτελεί την λειτουργία της η μονάδα του *readout* ονομάζεται *setDepth*. Για το σύστημα *ecat* που επιλέξαμε στην συγκεκριμένη προσομοίωση θα ισχύει:

- επίπεδο *base* = depth 0
- επίπεδο *block* = depth 1
- επίπεδο *crystal* = depth 2

Στην συνέχεια πρέπει να συμπεριλάβουμε στην προσομοίωσή μας και την ενεργειακή διακριτική ικανότητα (*energy resolution*) του ανιχνευτή. Σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφών της HR+ η διακριτική ικανότητα των κρυστάλλων θα είναι ίση με

$$\frac{\sigma E}{E} = 19\% \text{ με ενέργεια αναφοράς } E = 511 \text{ keV (ενέργεια ακτίνων γάμμα).}$$

```
# E N E R G Y   B L U R R I N G
/gate/digitizer/Singles/insert blurring
/gate/digitizer/Singles/blurring/setResolution 0.26
/gate/digitizer/Singles/blurring/setEnergyOfReference 511. keV
```

Στην συνέχεια επιλέγουμε ένα ενεργειακό παράθυρο που θα καθορίζει ποια *Singles* θα συλλέξουμε κατά την προσομοίωση ανάλογα με την ενέργεια τους. Έτσι συλλέγονται μόνο εκείνα τα *Singles* που έχουν ενέργεια εντός των ορίων του ενεργειακού παραθύρου που καθορίζει ο χρήστης. Στην περίπτωση της HR+ επιλέγουμε ένα ενεργειακό παράθυρο από 0 keV έως 511 keV .

```
# E N E R G Y   C U T
/gate/digitizer/Singles/insert thresholder
```

```
/gate/digitizer/Singles/thresholder/setThreshold 0. keV
/gate/digitizer/Singles/insert upholder
/gate/digitizer/Singles/upholder/setUphold 750. keV
```

Ο λόγος που επιλέγουμε μηδενικό ενεργειακό κατώφλι είναι ότι επιθυμούμε να συλλέξουμε όλα τα ανιχνευόμενα *Singles* ακόμα και εκείνα πολύ χαμηλών ενεργειών έτσι ώστε να μελετήσουμε φαινόμενα σκέδασης, καθώς τα *Singles* χαμηλών ενεργειών γνωρίζουμε ότι προέρχονται από αλληλεπιδράσεις Compton.

Άλλη μια σημαντική παράμετρος του *digitizer* είναι ο νεκρός χρόνος απόκρισης (dead time) του συστήματος της HR+. Ο ορισμός του dead time και των μοντέλων που χρησιμοποιεί το GATE για την προσομοίωση της επίδρασης του στην γενική επίδοση του ρυθμού μέτρησης δεδομένων ενός συστήματος αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 3.10.2 του τρίτου κεφαλαίου. Εδώ, ακολουθώντας τις τεχνικές προδιαγραφές, επιλέγουμε $\text{dead time}=3000000\text{ps}$ και το *paralysable* μοντέλο.

```
#           D E A D       T I M E
/gate/digitizer/Singles/insert deadtime
/gate/digitizer/Singles/deadtime/setDeadTime 3000000. ps
/gate/digitizer/Singles/deadtime/setMode paralysable
/gate/digitizer/Singles/deadtime/chooseDTVVolume block
```

Το αντικείμενο στο οποίο εφαρμόζουμε την μοντελοποίηση του φαινομένου του dead time είναι το αντικείμενο block.

Στην συνέχεια υλοποιούμε τον ταξινομητή συμπτώσεων (Coincidence Sorter) του *digitizer* ρυθμίζοντας το παράθυρο συμπτώσεων (Coincidence window) στα 10ns.

```
#           C O I N C I     S O R T E R
/gate/digitizer/Coincidences/setWindow 10. ns
```

4.4.7 Έβδομο βήμα: Ρύθμιση πηγής προσομοίωσης

Στο GATE η πηγή αντιπροσωπεύεται από ένα αντικείμενο στο οποίο τα σωματίδια (ποζιτρόνια, ακτίνες γάμμα, ιόντα, πρωτόνια,...) εκπέμπονται. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ορίσει την γεωμετρία της πηγής όπως επίσης και τα χαρακτηριστικά της όπως την κατεύθυνση της εκπομπής των σωματιδίων, την ενεργειακή κατανομή και φυσικά την ενεργότητα της πηγής. Ο χρόνος ζωής των ασταθών πηγών (ραδιενεργά ιόντα) είναι μια πληροφορία που αντλείται από την βάση δεδομένων του Geant4 αλλά μπορεί επίσης να ρυθμιστεί και από τον χρήστη.

Ένα διακριτοποιημένο (voxelised) phantom ή ένα σύνολο δεδομένων από έναν ασθενή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό μιας πηγής εάν θέλουμε να παράγουμε μια ρεαλιστική συλλογή δεδομένων εξόδου. Η περιγραφή του ορισμού των πηγών καθώς και μια εισαγωγή στον τρόπο χειρισμού των διακριτοποιημένων πηγών έχει ήδη πραγματοποιηθεί στην παράγραφο 3.9 του προηγούμενου κεφαλαίου.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέξαμε και για τα τέσσερα πειράματα να χρησιμοποιήσουμε πηγές ποζιτρονίων οι οποίες είναι ασταθής, έχουν χρόνο ημίσιας ζωής 6586sec και ενεργότητα ίση με 10MBq. Η πηγή αποτελείται από υδατικό διάλυμα φθορίου-18 και επομένως επιλέγουμε την προκαθορισμένη κατανομή ενεργειακού φάσματος του φθορίου-18 που διαθέτει το GATE. Η διαφορά ανάμεσα στα δύο πρώτα πειράματα και στα δύο τελευταία είναι η χρήση μιας σημειακής τέτοιας πηγής στα δύο πρώτα πειράματα και μιας γραμμικής πηγής ίδιων χαρακτηριστικών στο τρίτο και τέταρτο πείραμα. Οι διαστάσεις των δύο πηγών ακολουθούν επίσης τις προδιαγραφές NEMA. Έτσι η σημειακή πηγή έχει σχήμα κυλινδρικό με ύψος 1mm και ακτίνα επίσης 1mm, ενώ η γραμμική έχει επίσης


```

/gate/source/F18CylinderSource/gps/energytype Fluor18
/gate/source/F18CylinderSource/gps/type Volume
/gate/source/F18CylinderSource/gps/shape Cylinder
/gate/source/F18CylinderSource/gps/radius 0.5 mm
/gate/source/F18CylinderSource/gps/halfz 0.5 mm
/gate/source/F18CylinderSource/gps/angtype iso
/gate/source/F18CylinderSource/gps/centre 0.0 0.0 0. cm

```

Ακολουθεί το σύνολο εντολών που ορίζει την γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά της γραμμικής πηγής που χρησιμοποιείται στα πειράματα 3 και 4.

```

# F A S T   P R O D U C T I O N   M O D U L E   F O R   F - 1 8   I S
O T O P E S
/gate/source/addSource F18CylinderSource
/gate/source/F18CylinderSource/setActivity 10000000. becquerel
/gate/source/F18CylinderSource/gps/particle e+
/gate/source/F18CylinderSource/setForcedUnstableFlag true
/gate/source/F18CylinderSource/setForcedHalfLife 6586 s
/gate/source/F18CylinderSource/gps/energytype Fluor18
/gate/source/F18CylinderSource/gps/type Volume
/gate/source/F18CylinderSource/gps/shape Cylinder
/gate/source/F18CylinderSource/gps/radius 2.5 mm
/gate/source/F18CylinderSource/gps/halfz 38. cm
/gate/source/F18CylinderSource/gps/angtype iso
/gate/source/F18CylinderSource/gps/centre 0.0 0.0 0. cm

```

Μετά από την εκτέλεση των παραπάνω εντολών ακολουθεί η εντολή

```
/gate/source/list
```

με την οποία δίνεται κατά την προσομοίωση η πληροφορία στον χρήστη σχετικά με το είδος και τα χαρακτηριστικά κάθε πηγής που περιγράφεται στην προσομοίωση.

4.4.8 Βήμα όγδοο: Ορισμός δεδομένων εξόδου

Οι τύποι δεδομένων εξόδου που είναι διαθέσιμοι στο GATE χωρίζονται σε δυο κατηγορίες:

- Τυπικά δεδομένα εξόδου: ASCII, Root
- Τύποι δεδομένων εξόδου εξαρτώμενοι από το σύστημα: LMF, sinogram, ecat7 και Interfile.

4.4.8.1 Τυπικά δεδομένα εξόδου

Τα ASCII δεδομένα εξόδου εκτείνονται σε τρία αρχεία που αντιστοιχούν σε τρία είδη δεδομένων (*Hits*, *Singles*, *Coincidences*). Τα δεδομένα εξόδου του Root αποτελούνται από ένα Ntuple (GATE) και τρία δένδρα T (*Hits*, *Singles*, *Coincidences*) στα οποία αποθηκεύονται το είδος αλληλεπίδρασης καθώς και χωρικές και χρονικές πληροφορίες που σχετίζονται με κάθε σωματίδιο. Οι συγκεκριμένοι τύποι δεδομένων εξόδου ενεργοποιούνται αυτόματα από το GATE εκτός και εάν καθοριστεί ρητά η απενεργοποίησή τους από τον χρήστη. Επομένως κάθε ένας από αυτούς τους δύο τύπους εξόδου μπορεί είτε να ενεργοποιηθεί είτε να απενεργοποιηθεί ανάλογα με το είδος της πληροφορίας που επιθυμεί ένας χρήστης να συλλέξει σε ένα πείραμα.

Εκτός από τους δύο παραπάνω τύπους, το GATE μπορεί να παρέχει στον χρήστη και ειδικά δεδομένα εξόδου, τα οποία εξαρτώνται από το προκαθορισμένο σύστημα που επιλέγει κάθε χρήστης στην αρχή της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα ο τύπος εξόδου LMF συνδέεται με το σύστημα *cylindricalPET*. Οι τύποι *Sinogram* και *ecat7* σχετίζονται με το σύστημα *ecat* και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση της HR+. Επίσης ο τύπος εξόδου *Interfile* σχετίζεται με το σύστημα *SPECTHead*.

Κάθε ένας από τους παραπάνω τύπους σχετίζεται με ένα σύνολο από παραμέτρους οι οποίοι πρέπει να ρυθμιστούν ορθά από τον χρήστη.

Με δεδομένο ότι το μοντέλο της HR+ έχει υλοποιηθεί με βάση το προκαθορισμένο σύστημα *ecat* του GATE, θα επιλέξουμε να αξιοποιήσουμε τους τύπους εξόδου *Sinogram* και *ecat7* και έτσι θα τους ενεργοποιήσουμε. Από τους προκαθορισμένους τύπους εξόδου επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε τον τύπο εξόδου *Root* και έτσι απενεργοποιούμε τον τύπο *ASCII*.

Η περιγραφή των τύπων δεδομένων εξόδου *Root*, *Sinogram* και *ecat7* καθώς και των αντίστοιχων παραμέτρων του κάθε ενός έχει πραγματοποιηθεί στην παράγραφο 3.11 του τρίτου κεφαλαίου.

Συγκεκριμένα για την έξοδο *Root* αυτής της προσομοίωσης επιλέγουμε να ενεργοποιήσουμε μόνο το GATE *Ntuple* και τα T-δένδρα των *Singles* και *Coincidences*. Οι υπόλοιπες πληροφορίες δεν είναι απαραίτητες κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και μπορούμε να τις παραλείψουμε για λόγους οικονομίας αποθηκευτικού χώρου στον δίσκο.

Για την έξοδο *Sinogram* καθορίζουμε τις παραμέτρους εφαπτομενικής (tangential) και αξονικής (axial) διακριτικής ικανότητας των κρυστάλλων-ανιχνευτών.

Τέλος για την έξοδο *ecat7* ρυθμίζουμε τις τιμές των παραμέτρων μέγιστης διαφοράς δακτυλίων (*maxringdiff*), εύρους ομάδας (*span*) και πολτοποίησης (*mashing*). Η λειτουργία κάθε παραμέτρου της εξόδου *ecat7* καθώς και τα πεδία τιμών και οι σχέσεις που πρέπει να ικανοποιούν περιγράφονται αναλυτικά στην παράγραφο 3.10.3 του τρίτου κεφαλαίου. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι το σύστημα της HR+ που προσομοιώνουμε αποτελείται από 32 δακτυλίους κρυστάλλων και επομένως οι επιτρεπόμενες τιμές της παραμέτρου *maxringdiff* θα είναι από 1 έως 31. Εμείς επιλέγουμε την τιμή 22 για την προσομοίωση μας και έτσι καταγράφονται οι απόλυτες τιμές των διαφορών των κρυσταλλικών δακτυλίων έως την τιμή 22. Στην συνέχεια εφαρμόζουμε την μέθοδο της πολικής πολτοποίησης (*polar mashing*) με στόχο την ομαδοποίηση των δισδιάστατων ημιτονογραμμάτων με γειτονικές πολικές συντεταγμένες. Το μέγεθος αυτής της ομαδοποίησης ονομάζεται *span* και στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγουμε να είναι ίσο με την τιμή 3. Με αυτόν τον τρόπο περιορίσαμε τον αριθμό των πολικών δειγμάτων στην τιμή 15 από την μέγιστη τιμή που ισούται με 63. Τέλος επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε την προκαθορισμένη τιμή 1 για τον παράγοντα πολτοποίησης (*mashing factor*) και έτσι δεν περιορίσαμε τον αριθμό των αζιμούθιων δειγμάτων. Αποτέλεσμα της ενεργοποίησης των τύπων εξόδου *Sinogram* και *ecat7* είναι η δημιουργία ενός ημιτονογράμματος (ένα αρχείο με επέκταση .S) το οποίο στην συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος σε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο ανακατασκευής και έτσι να παραχθεί η τελική εικόνα της σημειακής ή γραμμικής πηγής του περάματος μέσω του μοντελοποιημένου συστήματος της HR+. Με την επιλογή των συγκεκριμένων τιμών των παραμέτρων επιτυγχάνουμε σημαντική ελάττωση του μεγέθους του ημιτονογράμματος που προκύπτει.

```
#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#           D E F I N I T I O N   O F           #
#       Y O U R   O U T P U T   F I L E         #
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#

#           C H A N G E   T H E       S E E D (1)   O R   N O T (0)
/gate/output/root/setSaveRndmFlag 1

#           S E T U P   - R O O T _ F I L E
```

```

/gate/output/root/setFileName HR+_1_3newlongACT
/gate/output/root/setRootSinglesAdderFlag 0
/gate/output/root/setRootSinglesReadoutFlag 0
/gate/output/root/setRootHitFlag 0
/gate/output/root/setRootSinglesFlag 0
/gate/output/root/setRootNtupleFlag 0
/gate/output/root/setRootCoincidencesFlag 1

#      S E T U P   -   A S C I I   _   F I L E
/gate/output/ascii/setOutFileSinglesAdderFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileSinglesReadoutFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileSinglesThresholdFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileSinglesUpholderFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileSinglesFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileHitsFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileCoincidencesFlag 0

#      E C A T 7
/gate/output/sinogram/enable
/gate/output/sinogram/setTangCrystalBlurring 1.8 mm
/gate/output/sinogram/setAxialCrystalBlurring 1.8 mm

/gate/output/ecat7/enable
/gate/output/ecat7/verbose 2
/gate/output/ecat7/setFileName HR+_Ecat_1_3newlongACT
/gate/output/ecat7/describe
/gate/output/ecat7/mashing 1
/gate/output/ecat7/span 3
/gate/output/ecat7/maxringdiff 22

```

4.4.9 Ένατο βήμα: Καθορισμός της μεθοδολογίας λήψης δεδομένων

Στο επόμενο και τελευταίο βήμα ορίζουμε την μεθοδολογία απόκτησης δεδομένων (data acquisition) και εκκινούμε την διαδικασία καταγραφής των συμβάντων και λήψης των δεδομένων της προσομοίωσης. Η έναρξη και το τέλος της λήψης δεδομένων ορίζονται όπως σε ένα πραγματικό πείραμα, χρησιμοποιώντας τις εντολές `setTimeStart` και `setTimeStop`. Επιπρόσθετα όμως το GATE χρειάζεται και τον καθορισμό της παραμέτρου χρονικού τμήματος (`setTimeSlice`) η οποία προσδιορίζει το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το προσομοιωμένο σύστημα παραμένει στατικό. Στην έναρξη κάθε χρονικού τμήματος η γεωμετρία ανανεώνεται σύμφωνα με τις καθορισμένα από τον χρήστη χαρακτηριστικά κίνησης. Κατά την διάρκεια κάθε χρονικού τμήματος, η γεωμετρία παραμένει στατική και εκτελείται η προσομοίωση της μεταφοράς σωματιδίων και η διαδικασία λήψης δεδομένων. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση, δεν εισάγουμε κίνηση στα πειράματά μας και επομένως δεν χρειάζεται να μοντελοποιήσουμε την κίνηση στο σύστημα HR+. Συνεπώς ο συνολικός χρόνος λήψης δεδομένων θα ισούται με την διάρκεια του μοναδικού χρονικού τμήματος που ορίζουμε. Επιλέγουμε ο χρόνος αυτός να είναι ίσος με 4sec. Έχοντας ρυθμίσει την ενεργότητα κάθε πηγής ίση με 10MBq εύκολα υπολογίζουμε ότι ο συνολικός αριθμός ποζιτρονίων που θα εκπέμψει κάθε πηγή κατά την διάρκεια ενός πειράματος θα ισούται με $4 \times 10 \times 10^6 = 4 \times 10^7$.

```

#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#           S T A R T   A C Q U I S I T I O N
#           T I M E   P A R A M E T E R S
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#

#
# EXPERIMENT
#
/gate/application/setTimeSlice      4.  s
/gate/application/setTimeStart     0.  s
/gate/application/setTimeStop      4.  s

#
# LET'S RUN THE SIMULATION!
#
/gate/application/startDAQ

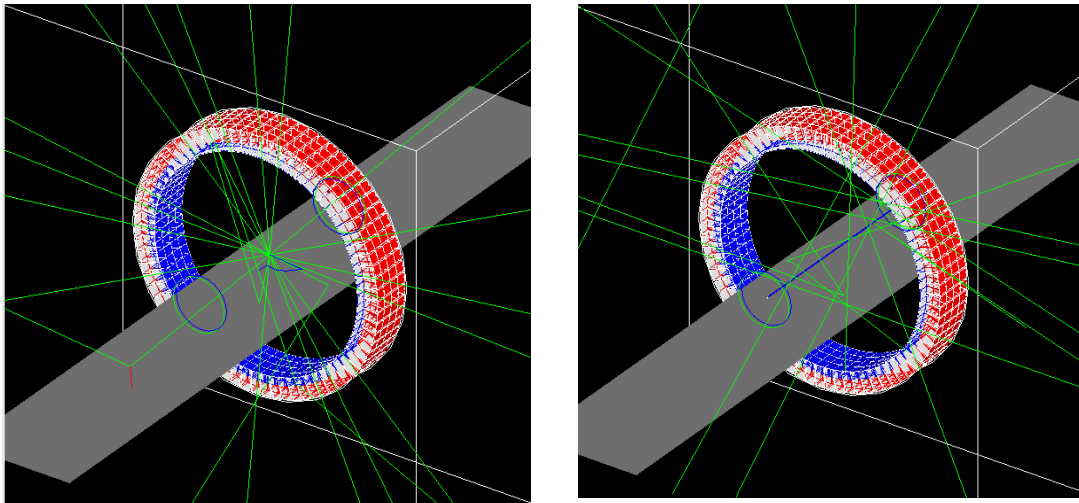
```

Ο αριθμός των τμημάτων κατά τα οποία εκτελείται η προσομοίωση ορίζεται από την σχέση:

$$N_{run} = \frac{setTimeStop - setTimeStart}{setTimeSlice}$$

Η έξοδος από το πρόγραμμα του GATE μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης επιτυγχάνεται με την εντολή `exit`.

Στην εικόνα 4.16 απεικονίζεται η εικόνα που μας δίνει το εργαλείο οπτικοποίησης OpenGLStoredX αφού εκκινήσει η διαδικασία λήψης των δεδομένων. Στην αριστερή εικόνα απεικονίζεται το σύστημα στην περίπτωση των πειραμάτων 1 και 2 όπου χρησιμοποιούμε σημειακή πηγή, ενώ στην δεξιά εικόνα παρουσιάζεται η αντίστοιχη εικόνα στην περίπτωση των πειραμάτων 3 και 4 όπου χρησιμοποιούμε γραμμική πηγή με την ίδια ενεργότητα. Κατά την διαδικασία λήψης δεδομένων παρατηρούμε ότι οπτικοποιούνται και οι τροχιές ορισμένων σωματιδίων.



Εικόνα 4.16 : Οπτικοποίηση του προσομοιωμένου συστήματος HR+ κατά την διαδικασία λήψης δεδομένων στην περίπτωση σημειακής πηγής (αριστερά) και γραμμικής πηγής (δεξιά).

4.5 Επεξεργασία και παρουσίαση αποτελεσμάτων

Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο η προσομοίωση του συστήματος ECAT EXACT HR+, εκτός από τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του ίδιου του συστήματος τομογραφίας εκπομπής, περιλαμβάνει επίσης και τον σχεδιασμό και την προσομοίωση πραγματικών πειραμάτων έτσι ώστε να αξιολογήσουμε την επίδοση και να επικυρώσουμε τα αποτελέσματα που εξάγει το συγκεκριμένο σύστημα απεικόνισης.

Η ακριβής προσέγγιση των δεδομένων εξόδου της προσομοίωσης στα αντίστοιχα δεδομένα εξόδου ενός πραγματικού συστήματος HR+ θεωρείται στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας δεδομένη και μάλιστα, όπως θα διαπιστώσουμε παρακάτω, επιβεβαιώνεται από την συμφωνία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αποτελέσματα που αναμένουμε από ένα πραγματικό πείραμα με χρήση της HR+. Το πακέτο λογισμικού προσομοίωσης GATE είναι ένα αξιόπιστο και ακριβές εργαλείο προσομοιώσεων και αυτό αποδεικνύεται από την εύρος των συστημάτων τομογραφίας εκπομπής τα αποτελέσματα των οποίων έχουν επικυρωθεί με χρήση του GATE.

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, θα παρουσιάσουμε στην συνέχεια τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τεσσάρων διαφορετικών πειραμάτων, παράλληλα θα τα επεξεργαστούμε έτσι ώστε να καταλήξουμε σε συγκεκριμένα συμπεράσματα για την επίδοση του συστήματος PET της HR+. Αυτή η διαδικασία θα μας οδηγήσει στην αξιολόγηση συγκεκριμένων παραμέτρων επίδοσης του συστήματος καθώς και στην επικύρωση των αποτελεσμάτων εξόδου. Τελικός στόχος αποτελεί η ανάδειξη της χρησιμότητας των πακέτων λογισμικού προσομοίωσης, στην συγκεκριμένη περίπτωση του GATE, των προγραμμάτων επεξεργασίας αποτελεσμάτων (ROOT, ecats) και τέλος των προγραμμάτων ανακατασκευής εικόνας (STIR) για την μελέτη της αποτελεσματικότητας ενός συστήματος και για την βελτιστοποίηση στην συνέχεια εκείνων των παραμέτρων επίδοσης που επιδέχονται βελτίωση.

4.5.1 Σχεδίαση πειραμάτων

Στις προηγούμενες παραγράφους αναφερθήκαμε περιληπτικά στον σχεδιασμό των πειραμάτων που προσομοιώθηκαν στα πλαίσια της μοντελοποίησης του συστήματος τομογραφίας εκπομπής ECAT EXACT HR+. Εδώ θα παρουσιάσουμε το σύνολο των βασικών μεταβλητών των πειραμάτων. Κατάλληλοι συνδυασμοί αυτών των μεταβλητών αντιστοιχούν και σε διαφορετικά πειράματα. Στόχος της σχεδίασης των πειραμάτων είναι η επιλογή των πιο κατάλληλων συνδυασμών πειραματικών μεταβλητών έτσι ώστε να προσδιοριστούν συγκεκριμένα πειράματα, τα αποτελέσματα των οποίων εάν επεξεργασθούν και συγκριθούν θα μας δώσουν χρήσιμες και ουσιαστικές πληροφορίες σχετικές με το αντικείμενο μελέτης μας. Συνεπώς είναι καθοριστική τόσο η επιλογή των μεταβλητών αυτών, αφού θα προσδιορίσουν τα πειράματα που θα πραγματοποιηθούν, όσο και η μεθοδολογία επεξεργασίας και σύγκρισης των πειραματικών αποτελεσμάτων, αφού είναι σημαντικό να εξάγουμε όσο το δυνατόν χρήσιμη και ουσιαστική πληροφορία από το δεδομένο, πλέον, σύνολο πειραμάτων.

Ο λανθασμένος πειραματικός σχεδιασμός μπορεί να οδηγήσει στην επιλογή μη χρήσιμων και ουσιαστικών πειραμάτων με αποτέλεσμα την σπατάλη χρόνου και χρήματος για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Επομένως η σχεδίαση πειραμάτων είναι αναγκαία εάν επιδιώκεται ο περιορισμός του κόστους σε χρόνο και χρήμα τόσο στην περίπτωση της εκτέλεσης πραγματικών πειραμάτων, όσο και στην περίπτωση των αντίστοιχων προσομοιώσεων.

Οι πειραματικές μεταβλητές που προσδιόρισαν το σύνολο των πειραμάτων που προσομοιώθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία είναι το είδος της πηγής φθορίου-18 και το υλικό από το οποίο θα αποτελείται το phantom του πειράματος. Οι δυνατές τιμές της πρώτης μεταβλητής είναι η σημειακή και η γραμμική πηγή φθορίου-18. Επίσης οι πιθανές τιμές της δεύτερης μεταβλητής είναι ο αέρας και το νερό ως συστατικό του phantom. Επισημαίνουμε στο σημείο αυτό πώς το σχήμα και οι διαστάσεις των πηγών και του phantom

ακολουθούν τις προδιαγραφές του προτύπου NEMA. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι που συμμετέχουν στον σχεδιασμό είναι ίδιες σε όλα τα πειράματα.

Στην συνέχεια επιλέγουμε τους κατάλληλους συνδυασμούς των πιθανών τιμών μεταξύ των δύο παραπάνω μεταβλητών για να προσδιορίσουμε το σύνολο των πειραμάτων που θα προσομοιώσουμε. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν τέσσερα πειράματα που περιγράφονται παρακάτω

1. Στο πρώτο πείραμα επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε σημειακή πηγή στον αέρα. Επομένως εφαρμόζουμε τον συνδυασμό σημειακής πηγής και αέρα ως υλικό του phantom.
2. Στο δεύτερο πείραμα επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε πάλι σημειακή πηγή αυτή τη φορά όμως μέσα σε phantom που περιέχει νερό. Επομένως εφαρμόζουμε τον συνδυασμό σημειακής πηγής και νερό ως υλικό του phantom.
3. Στο τρίτο πείραμα επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή τη φορά γραμμική πηγή στον αέρα. Επομένως εφαρμόζουμε τον συνδυασμό γραμμικής πηγής και αέρα ως υλικού του phantom.
4. Στο τέταρτο πείραμα επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε πάλι γραμμική πηγή αυτή τη φορά όμως μέσα σε phantom που περιέχει νερό. Επομένως επιλέγουμε τον συνδυασμό γραμμικής πηγής και νερού ως υλικού του phantom.

Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζουμε τα τέσσερα πειράματα που περιγράψαμε παραπάνω.

Είδος πηγής	<i>Phantom που περιέχει αέρα</i>	<i>Phantom που περιέχει νερό</i>
Σημειακή πηγή	Πείραμα 1	Πείραμα 2
Γραμμική πηγή	Πείραμα 3	Πείραμα 4

Πίνακας 4.1: Στην δεύτερη και τρίτη στήλη περιέχονται τα πειράματα όπου η πηγή βρίσκεται μέσα σε phantom που αποτελείται από αέρα και νερό αντίστοιχα. Επίσης στην δεύτερη και Τρίτη γραμμή περιέχονται τα πειράματα όπου χρησιμοποιήθηκε σημειακή και γραμμική πηγή αντίστοιχα

Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζουμε τις διαστάσεις των πηγών και του phantom που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων και οι οποίες ακολουθούν το πρότυπο NEMA για λόγους τυποποίησης των αποτελεσμάτων έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμα με αντίστοιχες μελέτες και προσομοιώσεις άλλων συστημάτων τομογραφίας εκπομπής.

Ονομασία αντικειμένου	Ύψος κυλίνδρου (mm)	Ακτίνα κυλίνδρου (mm)
Phantom	800 mm	101.5 mm
Σημειακή πηγή	1 mm	0.5 mm
Γραμμική πηγή	760 mm	2.5 mm

Πίνακας 4.2: Ύψος και ακτίνα κατά το πρότυπο NEMA των κυλινδρικών αντικειμένων του phantom καθώς και της σημειακής και της γραμμικής πηγής που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης

Επιπλέον οι υπόλοιπες παράμετροι που προσδιορίζουν τα πειράματα που θα προσομοιωθούν, παραμένουν σταθερές και ίσες και για τις τέσσερις διαφορετικές πειραματικές συνθήκες. Αποτελούν το σύνολο κονιών μεταβλητών αναφοράς των τεσσάρων διαφορετικών πειραμάτων και παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3

Σύστημα τομογραφίας εκπομπής	ECAT EXACT HR+
Διάρκεια πειράματος	4 sec
Ενεργότητα πηγής	1 MBq

Πίνακας 4.3 : Σταθερές πειραματικές μεταβλητές και για τα τέσσερα πειράματα που θα προσομοιωθούν. Η σταθερή μεταβλητή του συστήματος τομογραφίας εκπομπής υποδηλώνει ότι όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά που συνοδεύουν το σύστημα ECAT EXACT HR+ και έχουν παρουσιασθεί σε προηγούμενη ενότητα παραμένουν επίσης αμετάβλητα σε όλα τα πειράματα εκτός από τις τυχαίες μεταβλητές.

4.5.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στην παράγραφο αυτή θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα που προήλθαν από τα προγράμματα επεξεργασίας δεδομένων εξόδου που υποστηρίζει το GATE. Όπως έχουμε περιγράψει αναλυτικά στις παραγράφους 3.11 και 4.4.8 της συγκεκριμένης εργασίας για την προσομοίωση του συστήματος ECAT EXACT HR+ βασιστήκαμε στο προκαθορισμένο σύστημα *ecat* του GATE και ενεργοποιήσαμε τους τύπους δεδομένων εξόδου *Root*, *Sinogram* και *Ecat7*. Επομένως μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης δημιουργήθηκαν δύο αρχεία στα οποία το GATE αποθήκευσε συγκεκριμένα δεδομένα εξόδου σύμφωνα με τις επιλογές που όρισε ο χρήστης κατά την προσομοίωση. Οι επιλογές αυτές έχουν περιγραφεί αναλυτικά στην παράγραφο 4.4.8 και καθορίζουν την μορφή των αποτελεσμάτων που θα αναλύσουμε στην συνέχεια.

Τα προγράμματα επεξεργασίας που θα χρησιμοποιήσουμε για την ανάλυση αυτών των δεδομένων εξαρτώνται προφανώς από το είδος των δεδομένων που επιθυμούμε να αναλύσουμε κάθε φορά. Γνωρίζοντας ότι στην συγκεκριμένη προσομοίωση έχουμε ενεργοποιήσει δύο τύπους δεδομένων, ο κάθε ένας από τους οποίους μας δίνει διαφορετικά αλλά εξίσου χρήσιμη πληροφορία, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι θα πρέπει επίσης να χρησιμοποιήσουμε και περισσότερα από ένα προγράμματα για την ανάλυση των δεδομένων αυτών.

Για αυτόν ακριβώς τον λόγο επιλέγουμε να θεωρήσουμε δυο κατηγορίες δεδομένων και να επεξεργαστούμε την κάθε μια ανεξάρτητα από την άλλη.

Επομένως θεωρούμε τις επόμενες δύο κλάσεις δεδομένων εξόδου:

- Δεδομένα εξόδου τύπου *Root*
- Δεδομένα εξόδου τύπου *ecat7*

Στην συνέχεια αναλύεται κάθε κλάση δεδομένων ξεχωριστά στις επόμενες ενότητες

4.5.2.1 Δεδομένα εξόδου *Root*

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.4.8 στις ρυθμίσεις των παραμέτρων του τύπου εξόδου του *Root* επιλέχθηκε η ενεργοποίηση του GATE *Ntuple* και μόνο ορισμένων T-δένδρων (*Singles*, *Coincidences*) καθώς η πληροφορία των υπόλοιπων δομών δεν είναι σημαντική στα πλαίσια αυτής της ανάλυσης και θα καταλάμβανε πολύτιμο αποθηκευτικό χώρο στον δίσκο. Επιπλέον παρόλο που η πληροφορία που περιέχεται στο T-δένδρο των *Singles* είναι σημαντική, στην παρακάτω ανάλυση θα μας απασχολήσουν κυρίως τα δεδομένα *Coincidences* καθώς αποτελούν και την πραγματική πληροφορία σε ένα σύστημα PET που στην συνέχεια χρησιμοποιείται για την ανακατασκευή της τελικής εικόνας.

Ένα T-δένδρο στο *Root* αποτελείται από πολλά υποδένδρα που ονομάζονται φύλλα (*leaves*) του T-δένδρου. Κάθε ένα από αυτά τα φύλλα αντιπροσωπεύει και μια μεταβλητή της προσομοίωσης και για αυτό χρησιμοποιεί το όνομα της και ως δικό του όνομα. Σε κάθε φύλλο αποθηκεύονται αθροιστικά κατά την διάρκεια της προσομοίωσης οι τιμές των μεταβλητών που αντιπροσωπεύουν. Ένα φύλλο πρέπει να είναι μοναδικό στο T-δένδρο στο οποίο ανήκει. Έτσι το φύλλο *energy1* του T-δένδρου *Coincidence* περιέχει το ενεργειακό φάσμα εκείνων των *Singles* που αποτελούν το πρώτο μέλος στο ζεύγος των *Singles* που ορίζουν ένα συμβάν σύμπτωσης (*Coincidence events*). Αντίστοιχα το φύλλο *energy2* αποτελεί το ενεργειακό φάσμα εκείνων των *Singles* που αποτελούν το δεύτερο μέλος του ζεύγους των *Singles* που ορίζουν ένα συμβάν σύμπτωσης. Επίσης το φύλλο *energy* του T-δένδρου *Singles* περιέχει το αντίστοιχο ενεργειακό φάσμα του συνόλου των *Singles*. Επομένως η πληροφορία κάθε δένδρου καθορίζεται από το όνομα του και από το T-δένδρο στο οποίο ανήκει.

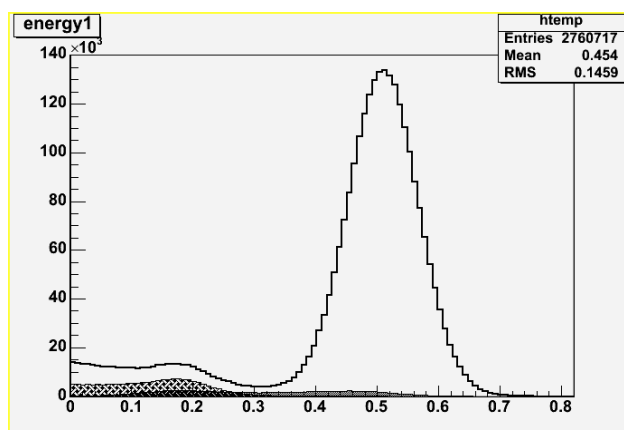
Η πληροφορία που περιέχεται σε ένα απλό φύλλο παρουσιάζεται από το *Root* με την μορφή διαγράμματος δύο διαστάσεων. Για την εμφάνιση της πληροφορίας δίνονται ειδικές μακροεντολές στο πρόγραμμα του *Root*. Υποστηρίζεται όμως και γραφική διεπαφή (graphical interface) μεταξύ χρήστη και περιβάλλοντος του προγράμματος. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής μιας εντολής στο σύστημα με το απλό πάτημα ενός εικονικού κουμπιού. Επιπλέον το *Root* επιτρέπει στον χρήστη να συνδυάσει το περιεχόμενο δύο ή και περισσότερων μεταβλητών σε ένα δισδιάστατο ή τρισδιάστατο διάγραμμα. Στην περίπτωση αυτή ο χρήστης μπορεί να καθορίσει σε ποιόν άξονα θα παριστάνεται κάθε μεταβλητή. Ακόμη υπάρχει η δυνατότητα σχεδίασης στους ίδιους άξονες περισσότερων του ενός διαγραμμάτων, όπως επίσης και της εισαγωγής περιοριστικών σχέσεων που πρέπει να ικανοποιούν τα πεδία ορισμού και τιμών κάθε μεταβλητής. Τέλος διατίθενται πολλά εργαλεία γραφικών για την οπτικοποίηση και εποπτική παρουσίαση των διαγραμμάτων.

Όλες αυτά τα εργαλεία είναι ορισμένες από τις δυνατότητες που προσφέρει στον χρήστη το *Root* και που αξιοποιήθηκαν παρακάτω για την ανάλυση των *Coincidences* δεδομένων. Θα χρησιμοποιηθούν δύο είδη διαγραμμάτων για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των τεσσάρων πειραμάτων και την σύγκριση μεταξύ τους.

Το πρώτο θα είναι το ενεργειακό φάσμα (energy spectrum) των πηγών φθορίου-18 που χρησιμοποιούνται. Το ενεργειακό φάσμα στην περίπτωση των *Coincidence events* ορίζεται ως ο αριθμός των ανιχνευόμενων ζευγών *Coincidences* σε συνάρτηση με την ενέργειά. Ο άξονας *X* παριστάνει την ενέργεια στο ενεργειακό παράθυρο $0-750\text{keV}$ που καθορίσαμε στον ορισμό του *digitizer* στο GATE ενώ ο άξονας *Y* παριστάνει τον αριθμό των ανιχνευόμενων ζευγών *Coincidences* ανά μια περιοχή ενεργειακών τιμών (energy bin) που επίσης μπορεί να οριστεί από τον χρήστη.

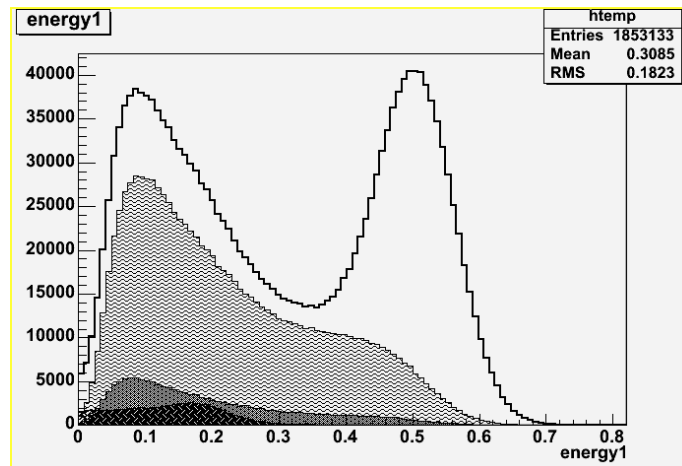
Στην εικόνα 4.17 έχουν σχεδιαστεί ορισμένα ενεργειακά φάσματα για την περίπτωση του πρώτου πειράματος, δηλαδή όταν προσομοιώνεται σημειακή πηγή μέσα σε phantom που περιέχει αέρα. Τα ενεργειακά φάσματα έχουν σχεδιαστεί με διαφορετικό πάχος γραμμής και διαγράμμιση έτσι ώστε να διακρίνονται μεταξύ τους. Συγκεκριμένα το ενεργειακό φάσμα με την πιο έντονη γραμμή αντιστοιχεί στο συνολικό ενεργειακό φάσμα που ανιχνεύεται από το σύστημα HR+. Θεωρητικά αναμένεται ένα ενεργειακό φάσμα με μόνο μια κορυφή στην ενέργεια αναφοράς των 511keV που αντιστοιχεί στην ενέργεια ακτινοβολίας γάμμα που εκπέμπεται μετά το φαινόμενο της εξαύλωσης και την οποία ορίσαμε και στον *digitizer*. Τότε όμως ορίσαμε και την ενεργειακή διακριτική ικανότητα (energy resolution) των κρυστάλλων ανιχνευτών του GATE. Αυτή η διακριτική ικανότητα, που οφείλεται στους κρυστάλλους BGO που διαθέτει το σύστημα HR+, είναι υπεύθυνη για την απόκλιση της κατανομής του φάσματος γύρω από την ενέργεια αναφοράς. Ωστόσο το ενεργειακό φάσμα σε ένα πραγματικό πείραμα με την HR+ περιλαμβάνει τόσο τα πραγματικά συμβάντα σύμπτωσης όσο και εκείνα, που ανιχνεύθηκαν ως έγκυρα, αλλά προήλθαν από σκέδαση σε κάποιο αντικείμενο της γεωμετρίας το οποίο έχει συνδεθεί με τον sensitive detector *phantomSD*. Τα σκεδασμένα *Coincidences* προκαλούν ένα τοπικό μέγιστο στις χαμηλές ενέργειες στο συνολικό ενεργειακό φάσμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως, λόγω της σκέδασης τους σε διαφορά υλικά, έχουν χάσει μέρος της αρχικής ενέργειας τους και επομένως εμφανίζονται στο ενεργειακό φάσμα σε χαμηλές ενέργειες. Το *Root* μας δίνει την δυνατότητα να σχεδιάσουμε το ενεργειακό διάγραμμα μόνο εκείνων των *Coincidences* τα οποία αλληλεπιδράσαν με ένα συγκεκριμένο αντικείμενο, το οποίο έχει συνδεθεί με τον ανιχνευτή *phantomSD*. Αξιοποιώντας την δυνατότητα αυτή, σχεδιάζουμε το ενεργειακό φάσμα που αντιστοιχεί σε κάθε αντικείμενο που ανήκει στην παραπάνω κατηγορία. Έτσι στην εικόνα 4.17 έχει σχεδιαστεί με διαγράμμιση ανοικτού χρώματος το ενεργειακό φάσμα που αντιστοιχεί στα *Coincidences* που έχουν σκεδαστεί στο αντικείμενο bed (εξεταστικό τραπέζι). Ακόμη με λίγο πιο σκούρα διαγράμμιση έχει σχεδιαστεί το αντίστοιχο φάσμα που αντιστοιχεί στους PMTs (φωτοπολλαπλασιαστές). Παρατηρούμε πως και τα δύο φάσματα εμφανίζουν μέγιστο στην περιοχή χαμηλών ενεργειών ενώ είναι σχεδόν μηδενικά γύρω από την περιοχή της ενέργειας αναφοράς (511keV) επιβεβαιώνοντας με αυτόν τον τρόπο την θεωρία. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι σε όλα τα πειράματα αμελήσαμε την επίδραση της σκέδασης των *Coincidences* στο πλαστικό περίβλημα του phantom (το ονομάζουμε *phantomVol* στην προσομοίωση στο GATE) καθώς το ποσοστό των ποζιτρονίων που αλληλεπιδρούν με την συγκεκριμένη δομή είναι αμελητέο. Επιπλέον αξίζει να παρατηρήσουμε πως στην περίπτωση

της σκέδασης στους φωτοπολλαπλασιαστές ένα μικρό ποσοστό ποζιτρονίων διατηρεί την αρχική ενέργεια αναφοράς των 511keV και μετά την αλληλεπίδραση του με τους PMTs.



Εικόνα 4.17 : Ενεργειακά φάσματα στην περίπτωση του πρώτου πειράματος δηλαδή σημειακής πηγής στο εσωτερικό ενός phantom από αέρα. Έχουν σχεδιαστεί τα ενεργειακά φάσματα του συνόλου των ανιχνευόμενων *Coincidences* (έντονη γραμμή), των *Coincidences* που έχουν σκεδαστεί στο αντικείμενο της εξεταστικής τράπεζας (διαγράμμιση πλέγμα) και των *Coincidences* που έχουν σκεδαστεί στους φωτοπολλαπλασιαστές (διαγράμμιση σκούρου χρώματος)

Τα διαγράμματα της εικόνας 4.18 αντιπροσωπεύουν τις ίδιες φυσικές ποσότητες με τα αντίστοιχα προηγούμενα διαγράμματα με την διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή σχετίζονται με το δεύτερο πείραμα, όπου έχουμε πάλι σημειακή πηγή με την ίδια ενεργότητα αλλά διαφορετικό phantom. Τώρα το phantom αποτελείται από νερό το οποίο περιβάλλει την πηγή. Επομένως τώρα περισσότερα ποζιτρόνια σκεδαζονται στα μόρια του νερού και χάνουν μέρος της ενέργειάς τους. Η αύξηση των σκεδαζόμενων *Singles* καταγράφεται στο GATE αφού και το αντικείμενο phantom έχει συνδεθεί στον sensitive detector *phantomSD*. Επομένως αυξάνεται και η πιθανότητα δύο ζεύγη σκεδαζόμενων *Singles* να ικανοποιήσουν τα κριτήρια σύμπτωσης του GATE (τα οποία υπενθυμίζουμε προσεγγίζουν τα αντίστοιχα κριτήρια σύμπτωσης του πραγματικού συστήματος HR+) και επομένως αυξάνεται η πιθανότητα να θεωρηθούν ως έγκυρα *Coincidence* από το σύστημα. Η επίδραση της παρουσίας ενός phantom από νερό καταγράφεται και στο συνολικό ενεργειακό φάσμα (παχιά γραμμή) της εικόνας 4.18 όπου παρατηρείται μια μεγάλη αύξηση του αριθμού των ανιχνευόμενων *Coincidences* στις χαμηλές ενέργειες καθώς και μια ανάλογη ελάττωση των πραγματικών *Coincidences*, εκείνων δηλαδή που αντιστοιχούν στην ενέργεια αναφοράς των 511keV. Με διαγράμμιση ανοικτού χρώματος σχεδιάζεται το φάσμα των *Coincidences* που έχουν σκεδαστεί στο phantom από νερό και το οποίο συμβάλλει καθοριστικά στην αύξηση του αριθμού των σκεδαζόμενων *Coincidences*. Στο πείραμα 1, όπως παρατηρούμε και από την εικόνα 4.17, αμελήσαμε το αντίστοιχο φάσμα, διότι στην περίπτωση αυτή το υλικό του phantom είναι ο αέρας, ο οποίος χαρακτηρίζεται από πολύ μικρή πυκνότητα και αλληλεπιδρά ελάχιστα με τα ακτινοβολούμενα ποζιτρόνια. Τα φάσματα που αντιστοιχούν στο εξεταστικό τραπέζι και στους φωτοπολλαπλασιαστές έχουν αυξηθεί σε σχέση με το πείραμα 1, αλλά σε πολύ μικρό βαθμό, επιβεβαιώνοντας πως η παρουσία του νερού είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την αύξηση του ποσοστού των σκεδάσεων στο συνολικό ενεργειακό φάσμα.

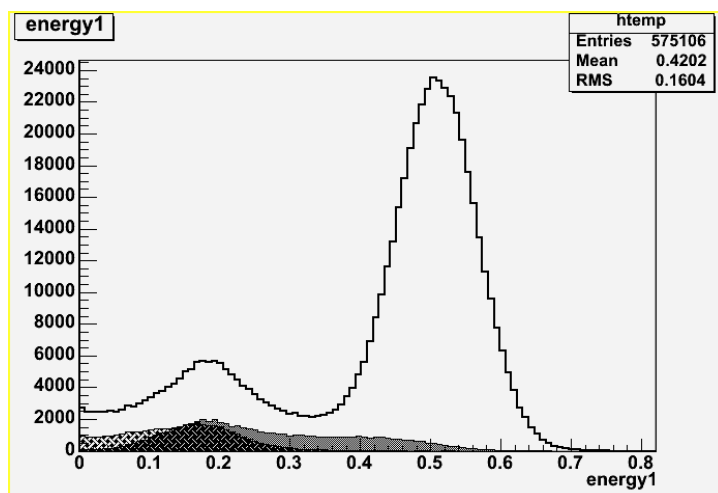


Εικόνα 4.18: Ενεργειακά φάσματα που αντιστοιχούν στο δεύτερο πείραμα δηλαδή στην περίπτωση σημειακής πηγής στο εσωτερικό ενός phantom με νερό. Έχουν σχεδιαστεί τα ενεργειακά φάσματα του συνόλου των ανιχνευόμενων *Coincidences* (έντονη γραμμή), των *Coincidences* που έχουν σκεδαστεί στο νερό (διαγράμμιση ανοιχτού χρώματος), των *Coincidences* που έχουν σκεδαστεί στο αντικείμενο της εξεταστικής τράπεζας (διαγράμμιση πλέγμα) και των *Coincidences* που έχουν σκεδαστεί στους φωτοπολλαπλασιαστές (διαγράμμιση σκούρου χρώματος)

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα ενεργειακών φασμάτων για την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται γραμμική πηγή με τις διαστάσεις που φαίνονται στον πίνακα 4.2. Οι υπόλοιπες παράμετροι της σειράς πειραμάτων, δηλαδή το σύστημα απεικόνισης, η διάρκεια του πειράματος και η ενεργότητα της πηγής παραμένουν σταθερές στις τιμές του πίνακα 4.3.

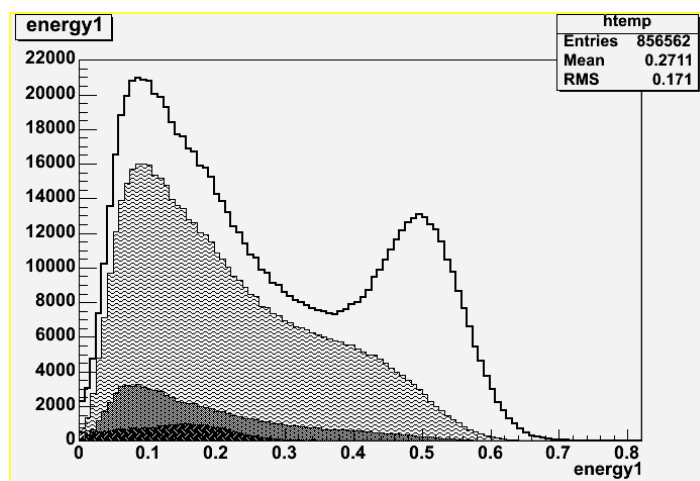
Συγκεκριμένα στην εικόνα 4.19 σχεδιάζονται τα αντίστοιχα ενεργειακά φάσματα της εικόνας 4.17 για την περίπτωση όμως του πειράματος 3, δηλαδή γραμμικής πηγής στον αέρα. Παρατηρούμε ότι όλα τα φάσματα είναι της ίδιας μορφής αλλά τα συνολικά ανιχνευόμενα *Coincidences* είναι στην περίπτωση αυτή πολύ λιγότερα. Βέβαια ανάλογη μείωση παρατηρείται και στον αριθμό των *Coincidences* που έχουν αλληλεπιδράσει με την εξεταστική τράπεζα (bed) και τους φωτοπολλαπλασιαστές (PMTs). Επομένως τα ποσοστά σκέδασης για κάθε αντικείμενο παραμένουν ίδια με τα αντίστοιχα ποσοστά στην περίπτωση του πειράματος 1.

Η ελάττωση των ανιχνευόμενων *Coincidences* οφείλεται στο γεγονός πως τώρα η σημειακή πηγή έχει αντικατασταθεί από μια γραμμική πηγή ίδιας ενεργότητας. Στο GATE όμως η ενεργότητα κάθε πηγής κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη τον όγκο της. Επομένως ενώ στην σημειακή πηγή όλη η ενεργότητα είναι συγκεντρωμένη σε ένα σημείο (στο κέντρο του πεδίου οράσεως του συστήματος HR+) στη γραμμική πηγή κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος της. Συνεπώς στο κέντρο του πεδίου οράσεως (FOV) η ενεργότητα θα είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την ενεργότητα στο ίδιο σημείο, όταν χρησιμοποιούμε σημειακή πηγή. Η ενεργότητα μιας πηγής ορίζεται ως ο αριθμός των εκπεμπόμενων σωματιδίων στην μονάδα του χρόνου. Επομένως η μείωση της ενεργότητας επιφέρει και μείωση της πιθανότητας ανίχνευσης *Coincidences* από το σύστημα και επομένως ανάλογη πτώση των μεγίστων των ενεργειακών φασμάτων.



Εικόνα 4.19: Ενεργειακά φάσματα στην περίπτωση του τρίτου πειράματος δηλαδή γραμμικής πηγής στο εσωτερικό ενός phantom από αέρα. Έχουν σχεδιαστεί τα ενεργειακά φάσματα του συνόλου των ανιχνευόμενων Coincidences (έντονη γραμμή), των Coincidences που έχουν σκεδαστεί στο αντικείμενο της εξεταστικής τράπεζας (διαγράμμιση πλέγμα) και των Coincidences που έχουν σκεδαστεί στους φωτοπολλαπλασιαστές (διαγράμμιση σκούρου χρώματος)

Αντίστοιχα στην εικόνα 4.20 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα ενεργειακά φάσματα της εικόνας 4.18 κάτω όμως από τις συνθήκες του τέταρτου πειράματος, δηλαδή όταν η σημειακή πηγή μέσα στο phantom από νερό έχει αντικατασταθεί από την ίδια την γραμμική πηγή που χρησιμοποιήθηκε και στο τρίτο πείραμα. Και εδώ παρατηρείται ότι τα αντίστοιχα ενεργειακά φάσματα είναι της ίδιας μορφής με την περίπτωση του πειράματος 2 (εικόνα 4.18) αλλά τα τοπικά μέγιστα έχουν μειωθεί αισθητά.

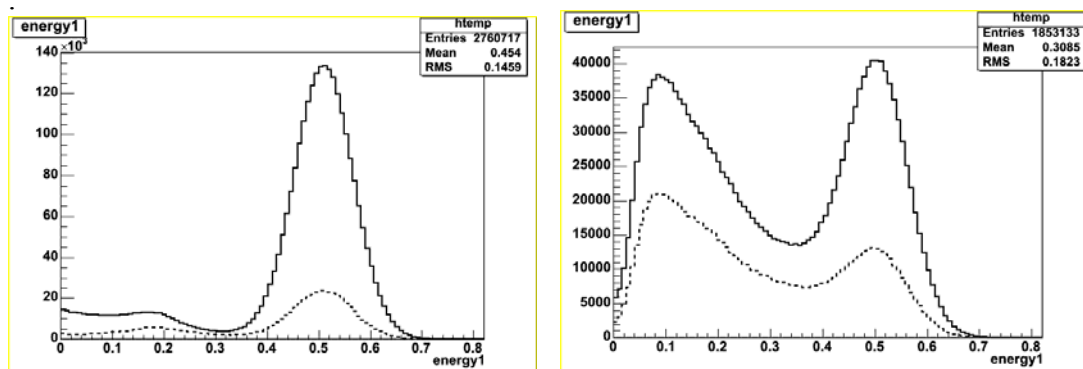


Εικόνα 4.20: Ενεργειακά φάσματα που αντιστοιχούν στο δεύτερο πείραμα δηλαδή στην περίπτωση σημειακής πηγής στο εσωτερικό ενός phantom με νερό. Έχουν σχεδιαστεί τα ενεργειακά φάσματα του συνόλου των ανιχνευόμενων Coincidences (έντονη γραμμή), των Coincidences που έχουν σκεδαστεί στο νερό (διαγράμμιση ανοιχτού χρώματος), των Coincidences που έχουν σκεδαστεί στο αντικείμενο της εξεταστικής τράπεζας (διαγράμμιση πλέγμα) και των Coincidences που έχουν σκεδαστεί στους φωτοπολλαπλασιαστές (διαγράμμιση σκούρου χρώματος)

Το τοπικό μέγιστο που αντιστοιχεί στην ενέργεια αναφοράς των 511keV έχει μειωθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε το τοπικό μέγιστο που αντιστοιχεί στις χαμηλές ενέργειες και οφείλεται στο φαινόμενο της σκέδασης να είναι μεγαλύτερο. Ο λόγος για την συγκεκριμένη μείωση είναι

η συνδυασμένη δράση και των δύο παραγόντων μείωσης του συγκεκριμένου μεγίστου που περιγράψαν προηγουμένως και είναι η παρουσία νερού και το γεγονός ότι στην περίπτωση της γραμμικής η πηγή η τοπική ενεργότητα εντός του πεδίου οράσεως είναι μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη ενεργότητα στην περίπτωση σημειακής πηγής. Μόνο στο τέταρτο πείραμα δρουν παράλληλα και οι δύο αυτοί παράγοντες με αποτέλεσμα την ελάττωση του μεγίστου που αντιστοιχεί στην ενέργεια αναφοράς.

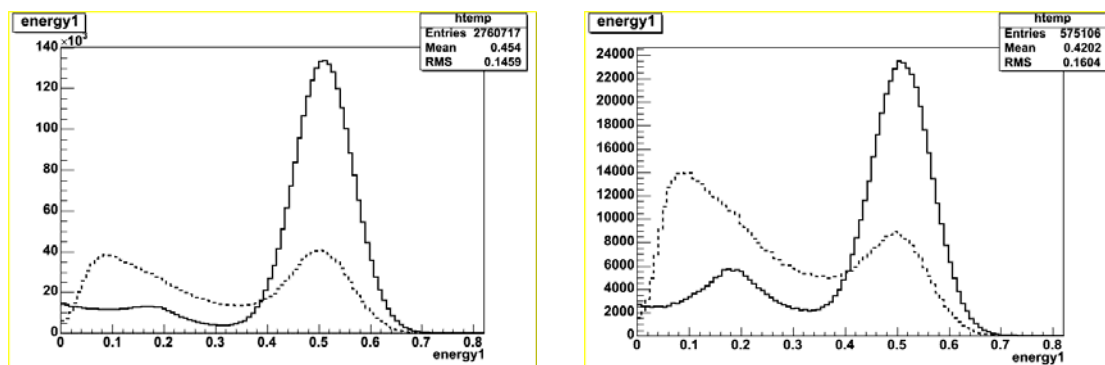
Η διαφοροποίηση μεταξύ των αντίστοιχων διαγραμμάτων των πειραμάτων 1 και 3 δεν αναδεικνύεται με την πρώτη παρατήρηση των εικόνων 4.17 και 4.19 καθώς στις συγκεκριμένες εικόνες τα ενεργειακά φάσματα έχουν κλιμακωθεί με βάση την μέγιστη τιμή τους, η οποία όμως είναι διαφορετική. Το ίδιο ισχύει και για τα διαγράμματα των πειραμάτων 2 και 4, όπου πάλι η διαφορά στις μέγιστες τιμές τους δεν αναδεικνύεται από μια πρώτη παρατήρηση των εικόνων 4.18 και 4.20. Για τον λόγο αυτό, και αξιοποιώντας την δυνατότητα του *Root* να σχεδιάζει στους ίδιους άξονες διαγράμματα διαφορετικών αρχείων *Root*, παρουσιάζονται στην εικόνα 4.21 (αριστερά) τα ενεργειακά φάσματα των συνολικά ανιχνευόμενων *Coincidences* για τις περιπτώσεις των πειραμάτων 1 και 3, δηλαδή με σημειακή και γραμμική πηγή στον αέρα αντίστοιχα. Επίσης στην εικόνα 4.21 (δεξιά) παρουσιάζονται τα αντίστοιχα ενεργειακά φάσματα στην περίπτωση των πειραμάτων 2 και 4. Συγκεκριμένα σχεδιάζονται με έντονη γραμμή τα ενεργειακά φάσματα της σημειακής πηγής στον αέρα (αριστερά) και στο νερό (δεξιά), ενώ με διακεκομμένη γραμμή τα αντίστοιχα φάσματα της γραμμικής πηγής



Εικόνα 4.21 : Ενεργειακά φάσματα συνολικά ανιχνευόμενων *Coincidences* για την περίπτωση σημειακής και γραμμικής πηγής στον αέρα (αριστερά) και στο νερό (δεξιά). Με έντονες γραμμές σχεδιάζονται τα ενεργειακά φάσματα των σημειακών πηγών ενώ με διακεκομμένες γραμμές τα ενεργειακά φάσματα των γραμμικών πηγών.

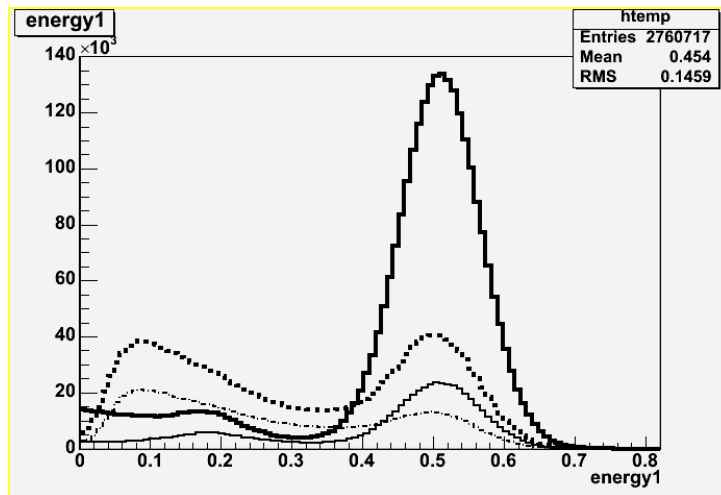
Από την παρουσίαση των διαγραμμάτων των εικόνων 4.17 – 4.20 αποκαλύπτεται ότι εκτός από το είδος της πηγής άλλος ένας παράγοντας που επιδρά στην μορφή των ενεργειακών φασμάτων είναι το υλικό που περιέχει το phantom που περικλείει την πηγή. Κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων παραπάνω παρατηρήσαμε ότι η παρουσία νερού γύρω από την πηγή έχει ως συνέπεια την αύξηση του ποσοστού των σκεδαζόμενων *Coincidences* που ανιχνεύονται από το σύστημα HR+ και ταυτόχρονα την ελάττωση των *Coincidences* που έχουν ενέργεια σε μια περιοχή γύρω από την ενέργεια αναφοράς των 511keV. Λόγω όμως της κλιμάκωσης των διαγραμμάτων ως προς τις μέγιστες τιμές τους, οι οποίες όμως διαφέρουν μεταξύ τους, δεν αναδεικνύεται εποπτικά ο ρόλος του υλικού του phantom στην διαμόρφωση των τελικών ενεργειακών φασμάτων. Για να επιτευχθεί η ανάδειξη της σημασίας του υλικού σχεδιάζουμε, με την βοήθεια του *Root* πάλι, τα ενεργειακά φάσματα των συνολικά ανιχνευόμενων *Coincidences* για σημειακή πηγή στον αέρα και στο νερό στους ίδιους άξονες. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται στις εικόνες 4.22 (αριστερά). Ουσιαστικά συγκρίνουμε τα ενεργειακά φάσματα των πειραμάτων 1 και 2, δηλαδή τα φάσματα που προκύπτουν εάν διατηρήσουμε σταθερό το είδος της πηγής (σημειακή πηγή) και μεταβάλλουμε το υλικό του phantom (αέρας και νερό). Ανάλογη διαδικασία ακολουθούμε και για τα αντίστοιχα

διαγράμματα των πειραμάτων 3 και 4, δηλαδή για τα ενεργειακά φάσματα των συνολικά ανιχνευόμενων *Coincidences* της γραμμικής πηγής στον αέρα και σε νερό. Έτσι προκύπτουν τα διαγράμματα των εικόνων 4.22 (δεξιά). Και στις δύο εικόνες, σχεδιάζονται τα ενεργειακά φάσματα που αντιστοιχούν στον αέρα και στο νερό με έντονη και διακεκομμένη γραμμή αντίστοιχα. Από την μελέτη τους παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της παρουσίας αέρα το ποσοστό σκέδασης βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα ενώ τα πραγματικά συμβάντα *Coincidence* που ανιχνεύθηκαν κατέχουν υψηλό ποσοστό. Αντίθετα όταν η πηγή, ανεξάρτητα από το είδος της, περιβάλλεται από νερό, το ποσοστό σκέδασης αυξάνεται σημαντικά ενώ το ποσοστό των πραγματικών *Coincidences* ελαττώνεται ανάλογα. Η παρουσία του νερού αυξάνει την πιθανότητα σκεδάσεων και επομένως και την πιθανότητα να ανιχνευθούν σκεδαζόμενα *Coincidences* ως έγκυρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ελαττωθεί κατά τον ίδιο βαθμό και η πιθανότητα να ανιχνευθούν τα πραγματικά *Coincidences*. Αυτή μεταβολή των πιθανοτήτων μεταφράζεται στην στοχαστική γλώσσα της Φυσικής και των Monte Carlo προσομοιώσεων σε ανάλογη μεταβολή του αριθμού των σκεδαζόμενων και των πραγματικών *Coincidences* που ανιχνεύονται από το σύστημα της HR+. Η μεταβολή αυτή με την σειρά της αντικατοπτρίζεται στα αντίστοιχα ενεργειακά φάσματα.



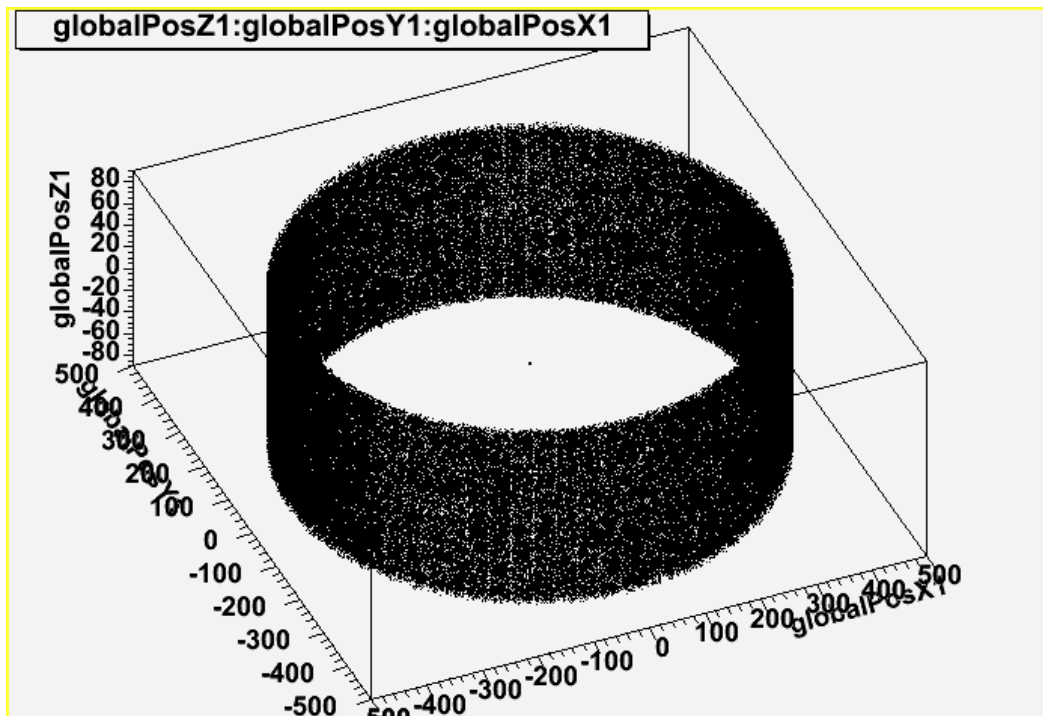
Εικόνα 4.22 : Ενεργειακά φάσματα συνολικά ανιχνευόμενων *Coincidences* για την περίπτωση phantom που περιέχει αέρα ή νερό με σημειακή (αριστερά) και γραμμική πηγή (δεξιά). Με έντονες γραμμές σχεδιάζονται τα ενεργειακά φάσματα των πηγών που περιβάλλονται από αέρα, ενώ με διακεκομμένες γραμμές τα ενεργειακά φάσματα των πηγών που περιβάλλονται από νερό..

Τα αποτελέσματα από τις συγκρίσεις των διαγραμμάτων των εικόνων 4.21 και 4.22 μπορούν να παρουσιαστούν συγκεντρωτικά στην εικόνα 4.23 παρακάτω. Συγκεκριμένα στην εικόνα αυτή σχεδιάζονται στους ίδιους άξονες τα ενεργειακά φάσματα των συνολικά ανιχνευόμενων *Coincidences* και για τα τέσσερα πειράματα που περιγράφονται στον πίνακα 4.1 . Η παρουσίαση αυτή δίνει την δυνατότητα της άμεσης σύγκρισης οποιουδήποτε συνδυασμού αποτελεσμάτων από τα τέσσερα πειράματα έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση κάθε παράγοντα που διαμορφώνει τα πειραματικά αποτελέσματα. Με αυτόν τον τρόπο η ανάλυση που παρουσιάστηκε προηγουμένως διεξοδικά συνοψίζεται στη μελέτη της εικόνας 4.23.

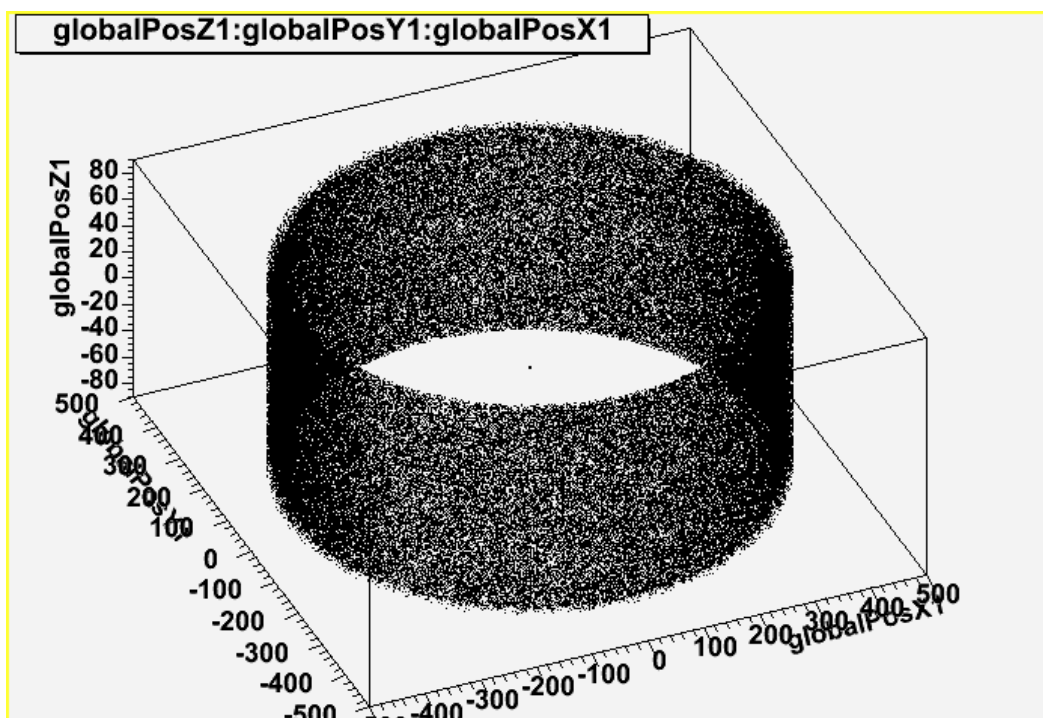


Εικόνα 4.23: Ενεργειακά φάσματα συνολικά ανιχνευόμενων *Coincidences* και για τα τέσσερα πειράματα. Με έντονη συνεχή γραμμή απεικονίζεται το φάσμα του πειράματος 1, με έντονη διακεκομμένη γραμμή το φάσμα του πειράματος 2, με κανονική γραμμή το φάσμα του πειράματος 3 και με κανονική διακεκομμένη γραμμή το φάσμα του πειράματος 4.

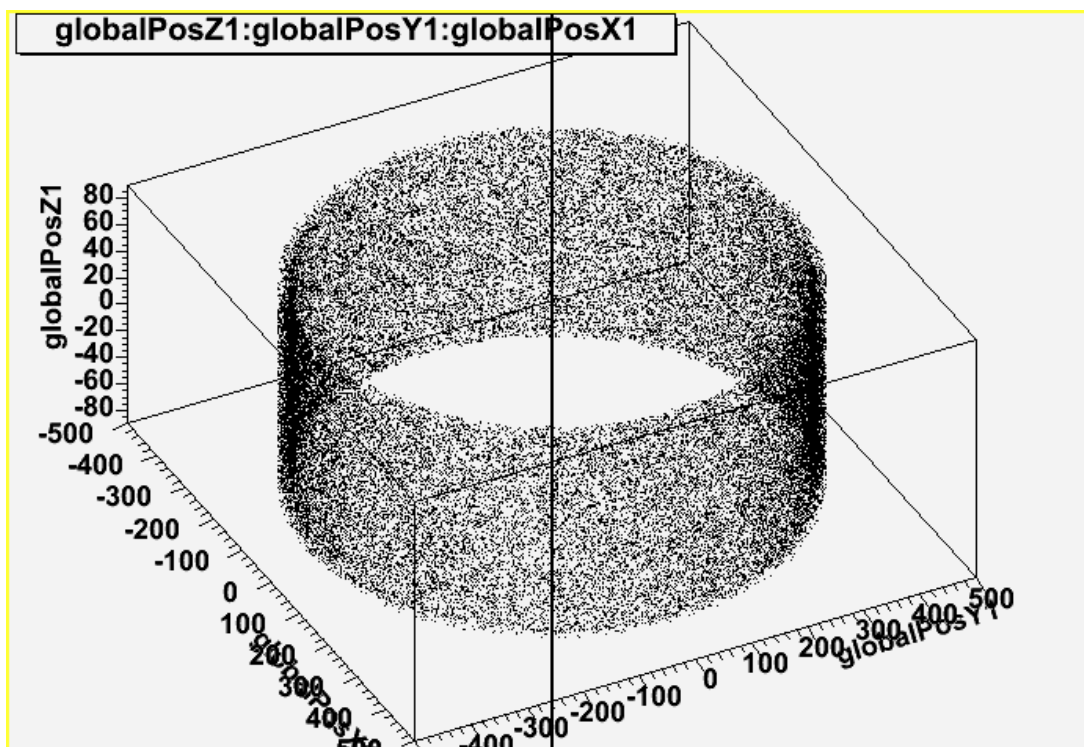
Εκτός από τα ενεργειακά φάσματα άλλος ένας δείκτης που χρησιμεύει στην αξιολόγηση της επίδοσης ενός συστήματος και της αντίστοιχης προσομοίωσης είναι ο τρισδιάστατος χάρτης απεικόνισης συμβάντων. Για την κατασκευή του χάρτη αυτού χρησιμοποιούμε τα δεδομένα των τριών φύλλων-μεταβλητών *globalX1*, *globalY1*, *globalZ1* του T-δένδρου *Coincidences*. Κάθε τέτοιο φύλλο περιέχει τον αριθμό των συμβάντων *Coincidences* που συνέβησαν κατά μήκος των αξόνων X, Y και Z του χώρου με κέντρο την αρχή των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων του GATE που ταυτίζεται με το κέντρο του FOV τους συστήματος HR+. Ο δείκτης 1 αναφέρεται στο πρώτο από τα δύο μέλη του ζεύγους των *Singles* που αποτελούν ένα *Coincidence*. Επομένως ο συνδυασμός του περιεχομένου αυτών των μεταβλητών στο *Root* οδηγεί στην κατασκευή ενός τρισδιάστατου διαγράμματος απεικόνισης των θέσεων στον χώρο όπου καταγράφηκαν τα συμβάντα *Coincidences*. Στο εξής θα ονομάζουμε το διάγραμμα αυτό τρισδιάστατο χάρτη *GlobalX1Y1Z1* για *Coincidences*. Αντίστοιχός χάρτης που να αφορά τα σημεία εκπομπής ποζιτρονίων, δηλαδή τα σημεία από τα οποία πηγάζει η ακτινοβολία ή με άλλα λόγια την κατανομή των πηγών του πειράματος μπορεί να κατασκευαστεί συνδυάζοντας με τον ίδιο τρόπο τα περιεχόμενα των μεταβλητών *sourcePosX*, *sourcePosY*, και *sourcePosZ*. Το τρισδιάστατο διάγραμμα κατανομής πηγών που προκύπτει το ονομάζουμε τρισδιάστατο χάρτη *SourcePosXYZ*. Στην συνέχεια σχεδιάζοντας αυτούς τους δύο χάρτες στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων προκύπτει ο τρισδιάστατος χάρτης *GlobalX1Y1Z1+SourcePosXYZ* για *Coincidences* ο οποίος μας δίνει μια εποπτική εικόνα για την χωρική κατανομή των ανιχνευόμενων *Coincidences* και των πηγών σε κάθε πείραμα. Στο διάγραμμα της εικόνας 4.24 παρουσιάζεται ένας τρισδιάστατος χάρτης αυτού του είδους για την περίπτωση του πρώτου πειράματος όπου έχουμε σημειακή κατανομή πηγής και παρουσία αέρα στο phantom. Ο αντίστοιχος χάρτης για το δεύτερο πείραμα παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.25 όπου έχουμε σημειακή πηγή με παρουσία νερού στο phantom. Επίσης στο διάγραμμα της εικόνας 4.26 παρουσιάζεται ο συγκεκριμένος τρισδιάστατος χάρτης για την περίπτωση του πειράματος 3, όπου έχουμε γραμμική κατανομή πηγής κατά μήκος του άξονα Z και παρουσία αέρα. Ο ίδιος τρισδιάστατος χάρτης για την περίπτωση του πειράματος 4, δηλαδή με χρήση γραμμικής πηγής και παρουσία νερού παρουσιάζεται στην εικόνα 4.27.



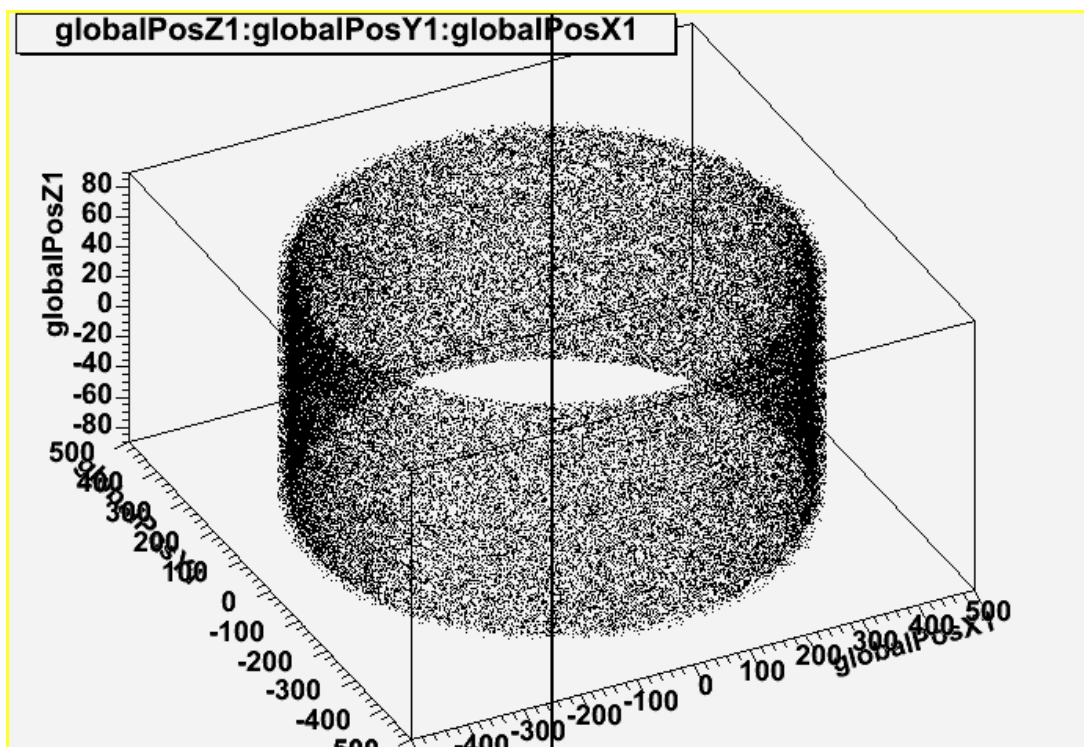
Εικόνα 4.24 Τρισδιάστατος χάρτης GlobalX1Y1Z1+SourcePosXYZ για Coincidences στην περίπτωση σημειακής πηγής στον αέρα (1^ο πείραμα)



Εικόνα 4.25 : Τρισδιάστατος χάρτης GlobalX1Y1Z1+SourcePosXYZ για Coincidences στην περίπτωση σημειακής πηγής στο νερό (2^ο πείραμα)



Εικόνα 4.26: Τρισδιάστατος χάρτης GlobalX1Y1Z1+SourcePosXYZ για Coincidences στην περίπτωση γραμμικής πηγής στον αέρα (3^ο πείραμα)



Εικόνα 4.27 : Τρισδιάστατος χάρτης GlobalX1Y1Z1+SourcePosXYZ για Coincidences στην περίπτωση γραμμικής πηγής στο νερό (4^ο πείραμα)

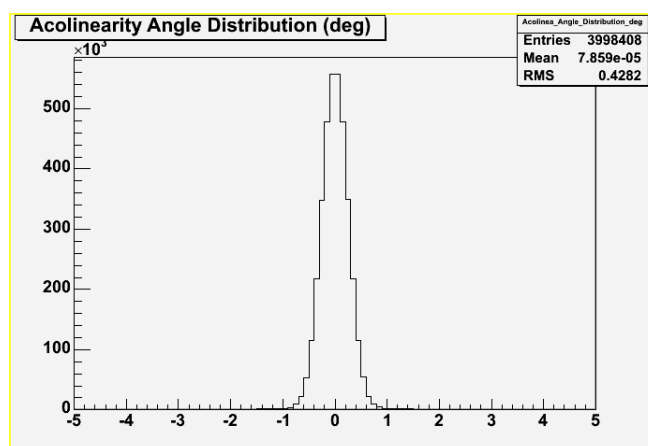
Παρατηρούμε πως η σημειακή κατανομή σχεδιάζεται με ένα μαύρο στίγμα στο κέντρο του FOV της HR+, ενώ η γραμμική κατανομή με μια ευθεία στον άξονα Z που εξέρχεται από το FOV και προς τις δύο πλευρές. Μια παρόμοια μορφή αναμένουμε να έχουν και οι αντίστοιχες ανακατασκευασμένες εικόνες που θα παρουσιαστούν αργότερα. Η θέση ανίχνευσης ενός συμβάντος *Coincidence* σχεδιάζεται επίσης με ένα μαύρο στίγμα. Όπως παρατηρούμε η συγκέντρωση των στιγμάτων αυτών είναι κατά μήκος της περιφέρειας των δακτυλίων του συστήματος, ακριβώς εκεί που βρίσκεται το σύνολο των κρυστάλλων-ανιχνευτών της HR+.

Η μεγάλη πυκνότητα στιγμάτων υποδηλώνει μεγάλο αριθμό ανιχνευμένων συμβάντων *Coincidences* στο συγκεκριμένο σημείο. Έτσι παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της σημειακής πηγής η πυκνότητα είναι μεγαλύτερη όπως αναμενόταν σύμφωνα με την ανάλυση των ενεργειακών φασμάτων που πραγματοποιήθηκε παραπάνω. Υπενθυμίζουμε ότι η σημειακή πηγή έχει συγκεντρωμένη την κατανομή της ενεργότητας στο κέντρο του FOV ενώ η γραμμική πηγή κατά μήκος του άξονα της, δηλαδή του άξονα Z και ένα μεγάλο μέρος εκτείνεται εκτός του FOV. Συνεπώς η ενεργότητα εντός του FOV είναι για την γραμμική πηγή μικρότερη και το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζεται και στους τρισδιάστατους χάρτες όπου παρατηρούμε χαμηλότερη πυκνότητα να αντιστοιχεί στην γραμμική πηγή. Επιπλέον παρατηρούμε ότι τόσο στη περίπτωση σημειακής όσο και στην περίπτωση γραμμικής πηγής η πυκνότητα των σημείων ανίχνευσης *Coincidences* είναι μικρότερη παρουσία νερού σε σχέση με όταν το phantom αποτελείται από αέρα. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς υποδεικνύει κάτι που έως τώρα δεν είχε επισημανθεί. Πρώτα όμως πρέπει να διευκρινιστεί ότι οι παραπάνω χάρτες απεικονίζουν τα σύμβαντα *Coincidences* που έχουν ανιχνευθεί στους κρυστάλλους του συστήματος HR+ ανεξάρτητα εάν ορισμένα από αυτά είχαν προηγουμένως σκεδαστεί κατά Compton σε διάφορα αντικείμενα όπως το εξεταστικό τραπέζι, οι φωτοπολλαπλασιαστές ή το νερό όταν υπάρχει. Επομένως απεικονίζουν το σύνολο των ανιχνευόμενων *Coincidences* χωρίς να ενδιαφέρει το ποσοστό των σκεδαζόμενων και των πραγματικών *Coincidences*. Στην ανάλυση των ενεργειακών φασμάτων υποτέθηκε σιωπηλά ότι το σύνολο αυτό παραμένει σχεδόν σταθερό με την προϋπόθεση ότι και το είδος της πηγής παραμένει το ίδιο. Έτσι, για παράδειγμα στα πειράματα 1 και 2 όπου έχουμε σημειακή πηγή, η παρουσία νερού θα αύξανε το ποσοστό των σκεδαζόμενων *Coincidences* και παράλληλα θα ελάττωνε στον ίδιο σχεδόν βαθμό το ποσοστό των πραγματικών *Coincidences* και επομένως δεν θα επηρέαζε σε σημαντικό βαθμό τον αριθμό των συνολικά ανιχνευόμενων *Coincidences*. Στην πραγματικότητα όμως ο συνολικός αριθμός ανιχνευόμενων *Coincidences* ελαττώνεται αρκετά παρουσία νερού διότι το νερό διαθέτει μεγαλύτερη πυκνότητα αέρα και έτσι εκτός από το ποσοστό των σωματιδίων που σκεδάζονται ή δεν αλληλεπιδρούν καθόλου με τα μόρια του νερού (και επομένως χάνουν ένα μέρος ή καθόλου ενέργεια αντίστοιχα) υπάρχει και ένα μικρό ποσοστό σωματιδίων που χάνουν όλη σχεδόν την ενέργειά τους και έτσι δεν εξέρχονται από το δοχείο του phantom. Αυτός ο αριθμός σωματιδίων πιθανώς να προκαλούσε έναν ανάλογο αριθμό συμβάντων *Coincidence* στην περίπτωση που αντί για νερό υπήρχε αέρας. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα πως η παρουσία νερού ελαττώνει το ποσοστό των πραγματικών *Coincidences* περισσότερο από όσο αυξάνει το ποσοστό των σκεδαζόμενων. Άρα τα συνολικά ανιχνευόμενα *Coincidences* ελαττώνονται όταν ο αέρας αντικαθίσταται από νερό και το είδος της πηγής παραμένει το ίδιο. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει εύκολα από την παρατήρηση των διαγραμμάτων των εικόνων 4.24 και 4.25 μεταξύ τους, αφού η πυκνότητα των σημείων ανίχνευσης (μαύρων στιγμάτων) είναι μεγαλύτερη στο πείραμα 1 παρόλο που και στα δύο πειράματα χρησιμοποιείται η ίδια σημειακή πηγή. Το ίδιο προκύπτει και από την αντίστοιχη σύγκριση των εικόνων 4.26 και 4.27. Βέβαια το συμπέρασμα αυτό εξάγεται επίσης μετά από προσεκτική παρατήρηση των διαγραμμάτων των εικόνων 4.22 όπου το εμβαδόν κάτω από τα διαγράμματα που αντιστοιχούν σε phantom από αέρα είναι μεγαλύτερο από το εμβαδόν κάτω από τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στο ίδιο είδος πηγής αλλά σε phantom από νερό.

Εκτός από τις μεταβλητές ενεργειακού φάσματος (energy) και χωρικών κατανομών πηγής και συμβάντων (sourcePos, global) τα αρχεία *Root* περιέχουν και πολλές άλλες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες αξιολόγησης της επίδοσης ενός συστήματος τομογραφίας ή της αντίστοιχης προσομοίωσης. Με αφορμή τις προσομοιώσεις των τεσσάρων πειραμάτων της

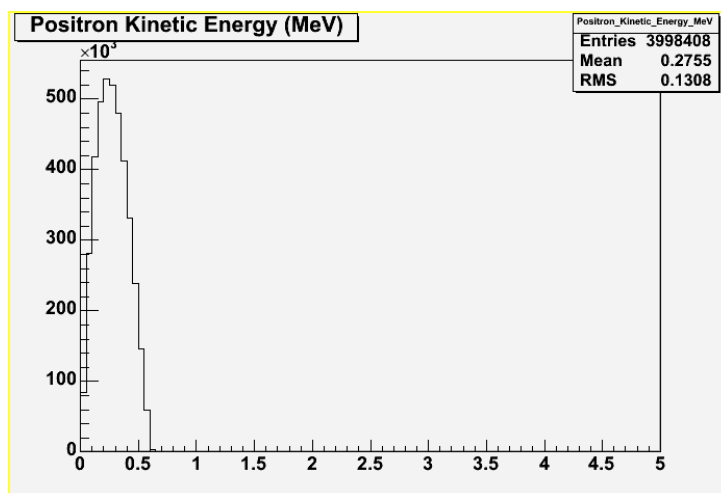
HR+ θα παρουσιαστεί το περιεχόμενο άλλων δύο τέτοιων φύλλων-μεταβλητών που όμως δεν ανήκουν σε κάποιο T-δένδρο του αρχείου *Root* αφού μετρούν φυσικές ποσότητες του πειράματος με βάση τις κλάσεις του Geant4 χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους τις παραμέτρους του *digitizer* του GATE.

Συγκεκριμένα στην εικόνα 4.28 σχεδιάζεται το διάγραμμα της μεταβλητής *AcolinearityAngleDistribution* που εκφράζει την κατανομή των ζευγών ποζιτρονίων που προέρχονται από την ίδια εξαύλωση ως προς την διαφορά της γωνίας που σχηματίζουν μεταξύ τους κατά την τελική τους αλληλεπίδραση με την ύλη από την γωνία των 180 μοιρών που ήταν και η αρχική γωνία εκπομπής μεταξύ τους. Στην ιδανική περίπτωση η τελική γωνία μεταξύ τους θα έπρεπε να παραμένει στις 180 μοίρες . Διάφοροι παράγοντες όμως προκαλούν την εκτροπή κάποιων ποζιτρονίων με αποτέλεσμα η γωνία μεταξύ των δύο ποζιτρονίων που προέρχονται από την ίδια εξαύλωση να είναι λίγο διαφορετική από 180 μοίρες. Ακριβώς η κατανομή αυτής της διαφοράς από τις 180 μοίρες σχεδιάζεται στο διάγραμμα της εικόνας 4.26. Βλέπουμε ότι πρόκειται για κατανομή Gauss με μέση τιμή την μηδενική γωνιακή διαφορά και FWHM ίσο με 1 μοίρα. Συνεπώς όλα τα ζεύγη ποζιτρονίων έχουν τελικά αλληλεπιδράσει σε σημεία που σχηματίζουν γωνία 180 μοιρών με απόκλιση 1 μοίρα πάνω ή κάτω. Επειδή το φαινόμενο αυτό είναι ανεξάρτητο των τεσσάρων πειραματικών συνθηκών που εξετάσαμε συνεπάγεται και πως το αντίστοιχο διάγραμμα της εικόνας 4.28 θα είναι ανεξάρτητο από το πείραμα που προσομοιώνεται κάθε φορά.



Εικόνα 4.28 : Κατανομή των ζευγών ποζιτρονίων που προέρχονται από την ίδια εξαύλωση ως προς την διαφορά της γωνίας που σχηματίζουν μεταξύ τους όταν αλληλεπιδρούν με τη ύλη από την γωνία των 180 μοιρών που ήταν η αρχική γωνία εκπομπής μεταξύ τους.

Επιπλέον η κατανομή των εκπεμπόμενων ποζιτρονίων ως προς την κινητική τους ενέργεια μπορεί να μας δώσει πολύτιμες πληροφορίες για τις ιδιότητες του φυσικού φαινομένου των αλληλεπιδράσεων των ποζιτρονίων και επομένως να συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων μιας προσομοίωσης . Η πληροφορία αυτή αποτελεί το περιεχόμενο της μεταβλητής *Positron Kinetic Energy* ενός αρχείου *Root* και παρουσιάζεται στο διάγραμμα της εικόνας 4.29. Και στην περίπτωση αυτή το διάγραμμα είναι το ίδιο, ανεξάρτητα από το πείραμα που προσομοιώνεται κάθε φορά.



Εικόνα 4.29: Κατανομή των ποζιτρονίων ως προς την κινητική τους ενέργεια σε MeV

Παρατηρείται πως η κινητική ενέργεια όλων των ποζιτρονίων βρίσκεται στην περιοχή από 0 έως 0.6 MeV και ακολουθεί κατανομή Gauss.

4.5.2.2 Δεδομένα εξόδου *ecat7*

Εκτός από τα δεδομένα εξόδου τύπου *Root*, τα οποία μπορούν να ενεργοποιηθούν από τον χρήστη ανεξάρτητα από το σύστημα που έχει επιλέξει, το GATE υποστηρίζει και άλλους τύπους εξόδου οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί ειδικά για συγκεκριμένα συστήματα και μπορούν να ενεργοποιηθούν μόνο όταν έχουν προεπιλεγεί αυτά τα συστήματα. Στην περίπτωση της προσομοίωσης της HR+ έχει επιλεγεί το σύστημα *ecat* του GATE. Ο τύπος εξόδου που συνδέεται αποκλειστικά με αυτό το σύστημα είναι ο *ecat7* και η περιγραφή της λειτουργίας του όπως και ο ορισμός των παραμέτρων του έχουν περιγραφεί διεξοδικά στην παράγραφο 3.11.3 του προηγούμενου κεφαλαίου. Επίσης οι τιμές που αποδόθηκαν στις παραμέτρους του *ecat7* όπως επίσης και ο αντίστοιχος κώδικας των μακροεντολών περιέχονται στην παράγραφο 4.4.8 αυτού του κεφαλαίου.

Οι παραπάνω επιλογές ρύθμισης του τύπου εξόδου *ecat7* είχαν ως αποτέλεσμα την δημιουργία στο τέλος της προσομοίωσης ενός ημιτονογράμματος. Το μέγεθος του συγκεκριμένου αρχείου, το οποίο είναι και ευθέως ανάλογο της ποσότητας πληροφορίας που περιέχει, καθορίζεται από την επιλογή των τιμών που θα ανατεθούν στις παραμέτρους *maxringdiff*, *span* και *mashing* με την προϋπόθεση ότι ικανοποιούνται κάποιοι περιορισμοί που αφορούν τα πεδία ορισμού των μεταβλητών αυτών καθώς και την μαθηματική σχέση που πρέπει να συνδέει τις συγκεκριμένες μεταβλητές. Οι περιορισμοί αυτοί έχουν παρουσιαστεί στις παραγράφους που προαναφέρθηκαν.

Σε αυτήν εδώ την παράγραφο θα θεωρηθεί το ημιτονόγραμμα που προέκυψε από την έξοδο τύπου *ecat7* ως δεδομένο και θα περιγραφούν συνοπτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την ανακατασκευή του έτσι ώστε να παραχθεί η τελική εικόνα του συστήματος HR+.

Το βασικό εργαλείο που θα χρησιμοποιήσουμε για την ανακατασκευή του ημιτονογράμματος είναι το ειδικό πακέτο λογισμικού για ανακατασκευή εικόνας STIR (Software for Tomographic Image Reconstruction). Το STIR είναι λογισμικό ανοιχτού κώδικα (Open Source) με εφαρμογές στην απεικόνιση τομογραφίας. Στόχος του είναι να παρέχει πάνω σε μια ποικιλία αρχιτεκτονικών υπολογιστικών συστημάτων ένα αντικειμενοστραφές περιβάλλον για όλα τα είδη διαχείρισης δεδομένων που χρησιμοποιούνται σήμερα στην τομογραφική απεικόνιση. Στις πρόσφατες εκδόσεις του δίδεται έμφαση στους (επαναληπτικούς) αλγορίθμους ανακατασκευής εικόνων από συστήματα PET, αλλά υπάρχει η δυνατότητα υποστήριξης και άλλων περιοχών εφαρμογής όπως επίσης και άλλων απεικονιστικών τεχνολογιών.

Το STIR αποτελεί τον διάδοχο της βιβλιοθήκης λογισμικού PARAPET η οποία ήταν το αποτέλεσμα του προγράμματος PARAPET που χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Έπειτα η βιβλιοθήκη αυτή επεκτάθηκε από τους ερευνητές του Hammersmith Imanet και τέλος

δημοσιοποιήθηκε σε μορφή λογισμικού ανοιχτού κώδικα. Το πακέτο λογισμικού μαζί με την απαραίτητη τεκμηρίωση (documentation) σε γραπτή και ηλεκτρονική μορφή είναι διαθέσιμα στην ιστοσελίδα του Hammersmith Imanet : <http://stir.hammersmithimanet.com/>

Στην συνέχεια περιγράφουμε τα βασικά χαρακτηριστικά του STIR τα οποία θα ληφθούν υπόψη για την ανακατασκευή του ημιτονογράμματος τύπου *ecat7*.

Συγκεκριμένα το STIR έχει αναπτυχθεί σε C++ και αποτελείται από κλάσεις, συναρτήσεις και βοηθητικά εργαλεία που σχετίζονται με ανακατασκευή τρισδιάστατων εικόνων PET.

Αποτελείται από δύο μέρη. Από

- μια βιβλιοθήκη που παρέχει τις βασικές δομές για διαχείριση δεδομένων (data manipulation) εικόνas και προβολών καθώς και για ανακατασκευή εικόνas (image reconstruction).
- Εφαρμογές που αξιοποιούν αυτήν την βιβλιοθήκη όπως εφαρμογές διαχείρισης δεδομένων εικόνas και προβολών, εφαρμογές μετατροπής τύπων αρχείων (file formats conversions) και φυσικά εφαρμογές ανακατασκευής εικόνas

Οι αλγόριθμοι ανακατασκευής που διανέμονται μαζί με το STIR καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας θα αναφερθούμε στην κατηγορία των επαναληπτικών αλγορίθμων ανακατασκευής (iterative reconstruction algorithms) και θα εφαρμόσουμε έναν συγκεκριμένο για την ανακατασκευή του ημιτονογράμματος της HR+.

Ο αλγόριθμος Μέγιστης Εκτίμησης (Expectation Maximization – EM) όπως επίσης και μια πιο γρήγορη σε χρόνο εκτέλεσης παραλλαγή του, ο αλγόριθμος Μέγιστης Εκτίμησης Διατεταγμένων Συνόλων (Ordered Set Expectation Maximization – OSEM) αποτελούν επαναληπτικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας της κατανομής ενός ιχνηθέτη με βάση δεδομένα προβολών που έχουν μετρηθεί. Τα πλεονεκτήματα τους έχουν μελετηθεί σε διάφορες εργασίες. Συγκεκριμένα αποδείχθηκε [Rea98b] ότι ο αλγόριθμος 3D OSEM μπορεί να παράγει εικόνες υψηλότερης ποιότητας, όσον αφορά τόσο την διακριτική ικανότητα και την αντίθεσή (contrast) τους, σε σχέση με τους αναλυτικούς αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται σε εμπορικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα ο αλγόριθμος επαναπροβολής (reprojection algorithm – 3DRP) [Kim89].

Ένα μειονέκτημα του αλγορίθμου OSEM είναι η τάση που εμφανίζουν να δημιουργούν παράσιτα θορύβου όταν αυξάνεται ο αριθμός των επαναλήψεων. Διάφορες μετατροπές του μηχανισμού ανανέωσης της εικόνας μετά από κάθε επανάληψη έχουν μελετηθεί για τους αλγορίθμους EM και OSEM ως τεχνικές αντιμετώπισης αυτού του μειονεκτήματος, όπως η σύγκλιση της ακολουθίας των διαδοχικών εκτιμήσεων της εικόνας σε πιο ομαλά όρια. Αυτή τεχνική περιλαμβάνει την εισαγωγή βημάτων εξομάλυνσης μεταξύ των επαναλήψεων.

Στο STIR έχουν υλοποιηθεί και είναι διαθέσιμες στον χρήστη διάφορες μεθοδολογίες φιλτραρίσματος. Η τεχνική του ύστερου φιλτραρίσματος (post-filtering) αποτελεί την πιο συνηθισμένη επιλογή. Όμως δίνεται και η δυνατότητα χρήσης και της μεθόδου Inter-iteration filtering κατά την οποία εφαρμόζονται φίλτρα ανάμεσα στις επαναλήψεις συμβάλλοντας στην δημιουργία μιας ακόμα πιο εξομαλυσμένης εικόνας.

Η πιο πρόσφατη έκδοση του STIR (έκδοση 1.4) υποστηρίζει πολλούς τύπους δεδομένων ημιτονογράμματος. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του πακέτου, υποστηρίζονται οι τύποι δεδομένων εξόδου των ακόλουθων συστημάτων PET:

- GE Advance, Discovery LS, Discovery ST
- PRT-1
- ECAT 921, 931, 953, 951, 962, 966 (καθώς και τα περισσότερα από τα υπόλοιπα συστήματα ECAT)
- HRRT

Επίσης λόγω της γενικευμένης δομής του STIR μπορούν να υποστηριχθούν και τα δεδομένα εξόδου και πολλών άλλων κυλινδρικών συστημάτων PET.

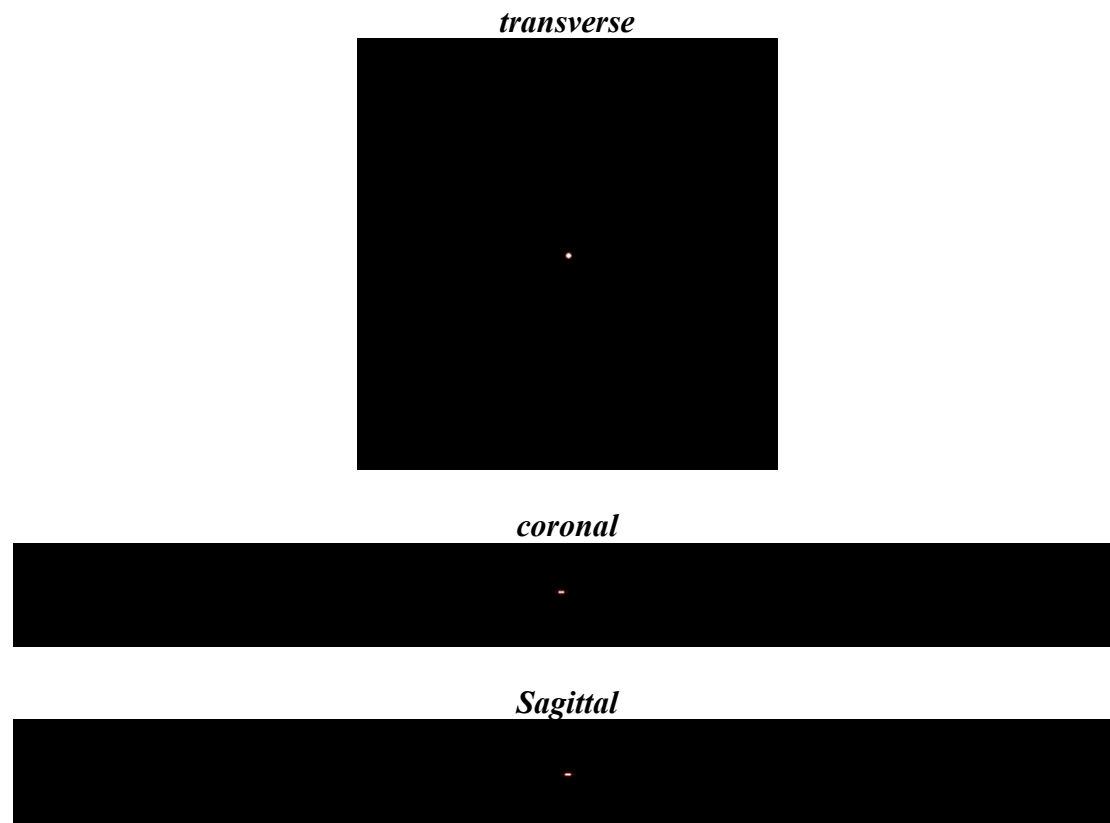
Στην συνέχεια παρουσιάζονται πιο συγκεκριμένα οι τύποι αρχείων δεδομένων που μπορούν να αναγνωριστούν από το STIR ως δεδομένα εισόδου προς ανακατασκευή.

- Αρχεία με επέκταση τύπου Interfile
- Ο τύπος αρχείου που περιέχει τα δεδομένα του ημιτονογράμματος του συστήματος GE Advance, αλλά υπάρχει μόνο η δυνατότητα ανάγνωσης. Τα δεδομένα του μοντέλου DiscoveryST δεν υποστηρίζονται ακόμα

- Ο τύπος μήτρας του ECAT6. Παρέχονται βοηθητικά εργαλεία μετατροπής του τύπου ECAT6 σε τύπο Interfile και αντίστροφα.
- Ο τύπος μήτρας του ECAT7 , αλλά υπάρχει η μόνο η δυνατότητα ανάγνωσης Η ανάγνωση αυτή επιτυγχάνεται με την δημιουργία μιας επικεφαλίδα (header) τύπου Interfile μέσω της συνάρτησης `ifheadersforecat7` . Η συνάρτηση αυτή δέχεται ως είσοδο το αρχείο τύπου ECAT7 και αναλαμβάνει να δημιουργήσει την επικεφαλίδα (τύπου `hs`) με την βοήθεια της οποίας θα μπορέσει στην συνέχεια το STIR να διαβάσει τα δεδομένα του αρχικού ECAT7 αρχείου.

Επειδή η έξοδος του `ecat7` του GATE παρέχει ένα αρχείο ημιτονογράμματος τύπου ECAT7 , χρησιμοποιείται σε αυτήν την εργασία η συνάρτηση `ifheadersforecat7` για την δημιουργία του αρχείου επικεφαλίδας με το οποίο το STIR διαβάζει τα δεδομένα του ημιτονογράμματος. Στην συνέχεια εκτελείται ο αλγόριθμος OSEM με παραμέτρους που δεν θα αναφέρουμε, καθώς η ανάλυσή τους ξεφεύγει από τα πλαίσια της εργασίας αυτής, και στο τέλος, μετά την ολοκλήρωση των επαναλήψεων, λαμβάνουμε τις ζητούμενες ανακατασκευασμένες εικόνες.

Στις εικόνες 4.30 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της τρισδιάστατης ανακατασκευής του πειράματος 1 δηλαδή στην περίπτωση όπου υπάρχει μια σημειακή πηγή στο κέντρο του πεδίου οράσεως της HR+ παρουσία αέρα. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η εικόνα που προέκυψε από την εκτέλεση του OSEM σε τρεις όψεις (*transverse*, *coronal*, *sagittal*). Η προβολή όλων των εικόνων που ανακατασκευάστηκαν από το STIR έγινε με χρήση του προγράμματος απεικόνισης AMIDE. Η ανακατασκευασμένη εικόνα του δεύτερου πειράματος (δηλ. σημειακή πηγή στο νερό) δεν διαφέρει από την αντίστοιχη του πρώτου πειράματος.



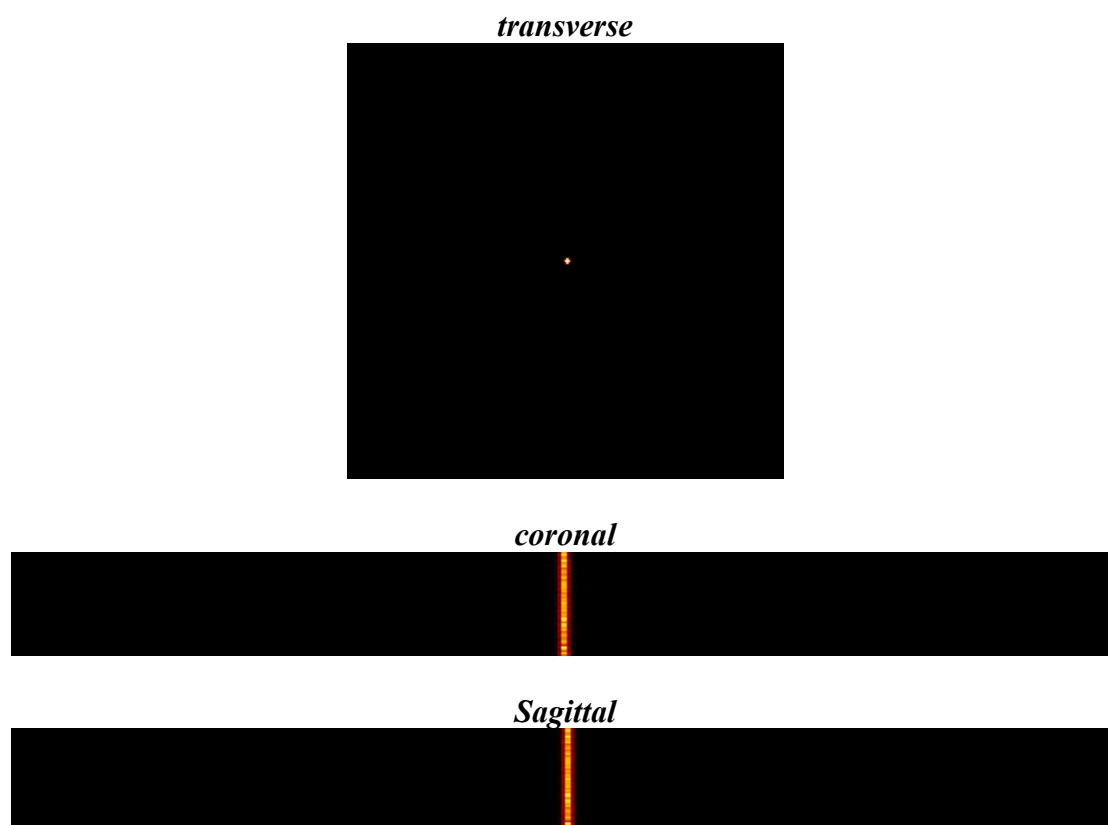
Εικόνα 4.30 : Τρεις όψεις της ανακατασκευασμένης εικόνας σημειακής πηγής στον αέρα (πείραμα 1^ο) με χρήση του επαναληπτικού αλγορίθμου OSEM στο STIR. Η προβολή στις τρεις όψεις έγινε με χρήση του προγράμματος AMIDE.

Στην συνέχεια στις εικόνες 4.31 παρουσιάζεται η ανακατασκευασμένη εικόνα του τρίτου πειράματος, δηλαδή όταν υπάρχει γραμμική πηγή παρουσία αέρα. Πάλι έγινε χρήση του προγράμματος AMIDE για την προβολή της εικόνας σε τρεις όψεις. Παρατηρούμε από τις

όψεις coronal και sagittal ότι φαίνεται μόνο το τμήμα εκείνο της γραμμικής πηγής που βρίσκεται στο εσωτερικό του FOV της HR+. Η ανακατασκευασμένη εικόνα του τέταρτου πειράματος (δηλ. γραμμική πηγή στο νερό) δεν παρουσιάζει καμία διαφοροποίηση.

4.5.3 Μελλοντικός πειραματικός σχεδιασμός

Ο πειραματικός σχεδιασμός και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους συνέβαλλαν καθοριστικά στην αξιολόγηση και επικύρωση της αποτελεσματικότητας του συστήματος τομογραφίας εκπομπής ECAT EXACT HR+. Τα πειράματα σχεδιάστηκαν να είναι όσο το δυνατόν απλά και με σαφώς καθορισμένες διαφορές έτσι ώστε τα αποτελέσματα της ανάλυσης να μπορούν να γίνουν εύκολα καταληπτά από τον χρήστη χωρίς ασάφειες. Στο άμεσο μέλλον έχουν προγραμματιστεί να πραγματοποιηθούν περισσότερα σύνθετα πειράματα με σκοπό την αξιολόγηση και άλλων παραμέτρων επίδοσης που σχετίζονται με την διακριτική ικανότητα και την ευαισθησία ενός συστήματος τομογραφίας εκπομπής. Στην συνέχεια παρουσιάζουμε συνοπτικά δύο πιο σύνθετες πειραματικές διατάξεις καθώς και τα αποτελέσματά τους μετά την προσομοίωση τους με χρήση του GATE.

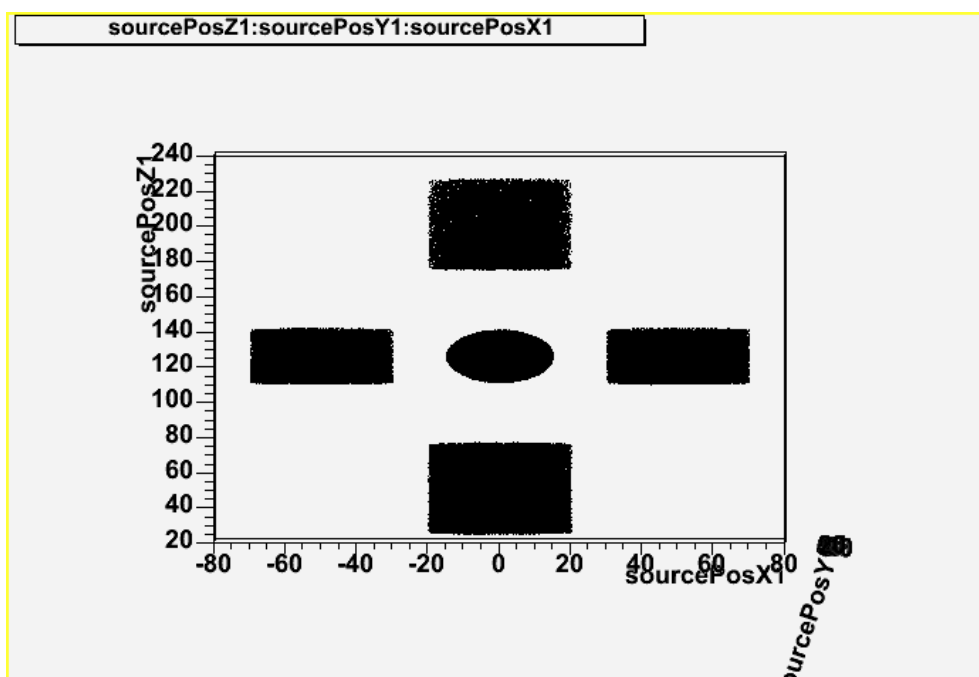


Εικόνα 4.31: Τρεις όψεις της ανακατασκευασμένης εικόνας γραμμικής πηγής στον αέρα (πείραμα 3^ο) με χρήση του επαναληπτικού αλγορίθμου OSEM στο STIR. Η προβολή στις τρεις όψεις έγινε με χρήση του προγράμματος AMIDE.

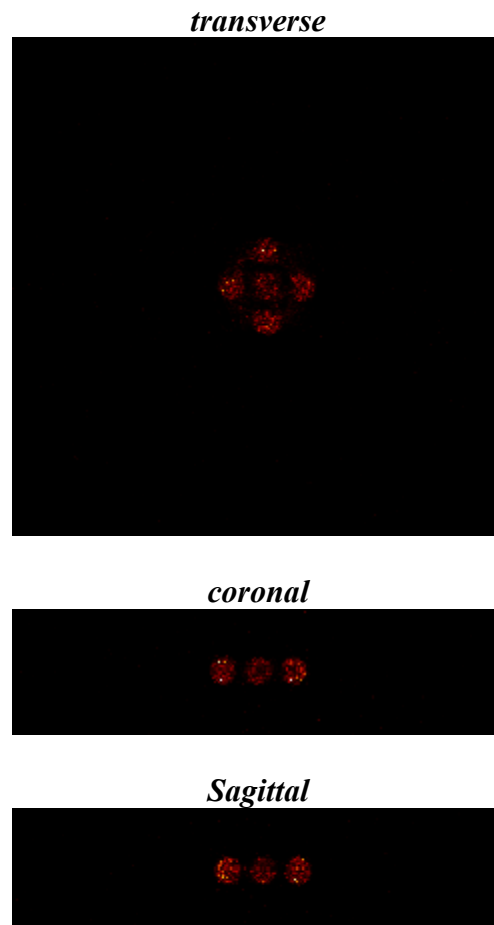
Το μοντέλο τομογραφικού συστήματος που επιλέχθηκε ήταν το μοντέλο της PET κάμερας HR+ που χρησιμοποιήσαμε και στα αρχικά τέσσερα πειράματα. Στην πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας θα περιοριστούμε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων και δεν θα προχωρήσουμε στην ανάλυση τους.

Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε μια κατανομή πηγής που αποτελείται από πέντε ίδιες σφαιρικές πηγές οι οποίες είναι διατεταγμένες σε σχήμα σταυρού. Η απόσταση μεταξύ τους είναι μικρότερη από την ακτίνα κάθε σφαίρας. Στην εικόνα 4.32 παρουσιάζεται ο τρισδιάστατος χάρτης κατανομής πηγών του αρχείου *Root* (SourcePosXYZ). Ακολουθως στην εικόνα 4.33 παρουσιάζεται η ανακατασκευασμένη εικόνα με χρήση του επαναληπτικού αλγόριθμου ανακατασκευής OSEM στο STIR και του προγράμματος προβολής AMIDE.

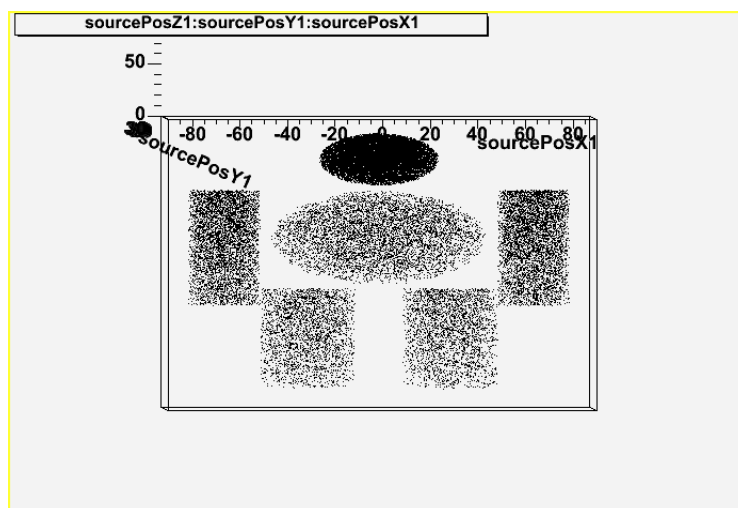
Στην συνέχεια σχεδιάστηκε ένα ακόμα πιο σύνθετο πείραμα. Αυτή τη φορά η κατανομή της πηγής είχε μορφή μικρού ανθρώπου έτσι ώστε να περιλαμβάνεται ολόκληρο το σώμα μέσα στο πεδίο όρασης του συστήματος της HR+ χωρίς να χρειαστεί να εισάγουμε κίνηση στο πείραμα. Η πηγή που αντιπροσωπεύει το κύριο σώμα είχε σχήμα κυλίνδρου ελλειπτικής διατομής ενώ οι πηγές που αντιπροσωπεύουν τα άκρα έχουν σχήμα κυλίνδρου κυκλικής διατομής. Τέλος η πηγή που αντιπροσωπεύει την κεφαλή έχει σφαιρικό σχήμα και μεγαλύτερη ενεργότητα από τις υπόλοιπες. Ο τρισδιάστατος χάρτης της κατανομής της πηγής απεικονίζεται στο διάγραμμα SourcePosXYZ του αρχείου *Root* της εικόνας 4.34 ενώ οι τρεις όψεις της ανακατασκευασμένης εικόνας παρουσιάζονται στις εικόνες 4.35 .



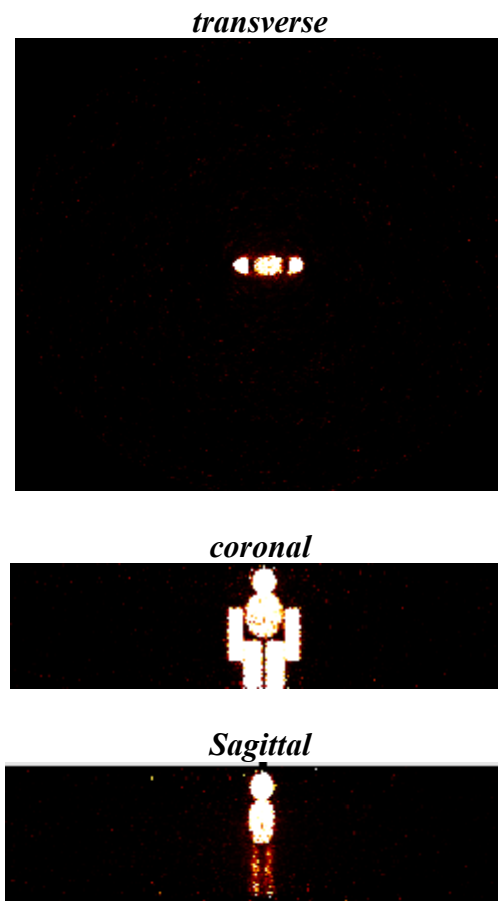
Εικόνα 4.32 : Τρισδιάστατος χάρτης SourcePosXYZ πέντε ίδιων σφαιρικών πηγών ίδιας ενεργότητας κατανεμημένες στο χώρο σε διάταξη σταυρού με χρήση του *Root*



Εικόνα 4.33 : Τρεις όψεις της ανακατασκευασμένης εικόνας πέντε σφαιρικών πηγών ίδιας ενεργότητας ύστερα από χρήση του επαναληπτικού αλγορίθμου OSEM στο STIR. Η προβολή στις τρεις όψεις έγινε με χρήση του προγράμματος AMIDE.



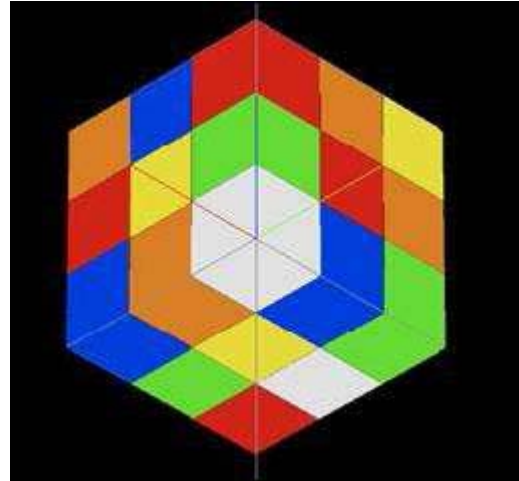
Εικόνα 4.34 Τρισδιάστατος χάρτης SourcePosXYZ έξι πηγών διαφορετικής ενεργότητας κατανεμμένες στο χώρο σε διάταξη μικρού ανθρώπινου σώματος με χρήση του Root



Εικόνα 4.35 : Τρεις όψεις της ανακατασκευασμένης εικόνας μιας κατανομής πηγής ανθρωποειδούς μορφής ομοιόμορφης με ομοιόμορφη κατανομή ενεργότητας ύστερα από χρήση του επαναληπτικού αλγορίθμου OSEM στο STIR. Η προβολή στις τρεις όψεις έγινε με χρήση του προγράμματος AMIDE.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Εξελίξεις στο χώρο των προσομοιώσεων



5.1 Γενική επισκόπηση εξελίξεων

Τα συστήματα τομογραφίας εκπομπής εξελίσσονται συνεχώς με στόχο την βελτιστοποίηση της επίδοσης λειτουργίας τους έτσι ώστε οι εικόνες που παράγονται να έχουν υψηλότερη διαγνωστική αξία, η λήψη δεδομένων και η ανακατασκευή της εικόνας να επιτυγχάνεται με μεγαλύτερη ταχύτητα ταχύτερα και το κόστος λειτουργίας να περιοριστεί. Οι απαιτήσεις για συνεχώς καλύτερη προσέγγιση της απόκρισης ενός πραγματικού συστήματος απεικόνισης από την απόκριση του αντίστοιχου μοντέλου του όταν και τα δύο δέχονται την ίδια διέγερση αυξάνονται διαρκώς. Από τη άλλη πλευρά αυτή η συνεχής αύξηση απαιτήσεων και προσδοκιών αναδεικνύει την αυξανόμενη σημασία που δείχνει η επιστήμη της Ιατρικής στις τεχνολογικές εφαρμογές της Πυρηνικής Ιατρικής Απεικόνισης και επομένως αποτελεί την καλύτερη απόδειξη για την σπουδαιότητα και χρησιμότητα των συγκεκριμένων εφαρμογών. Με αυτόν τον τρόπο η θέσπιση νέων προδιαγραφών υψηλότερου επιπέδου από τους χρήστες των εφαρμογών Πυρηνικής Ιατρικής Απεικόνισης, είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός τεράστιου ερευνητικού ενδιαφέροντος στο συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογών όπως επίσης και την εκπόνηση πολλών σχετικών επιστημονικών εργασιών τα τελευταία χρόνια. Αυτή η εξέλιξη αποτέλεσε τον κινητήριο μοχλό για την ώθηση της ανάπτυξης νέων εφαρμογών καθώς και για την βελτιστοποίηση ήδη ανεπτυγμένων πυρηνικής ιατρικής απεικόνισης. Σημαντικό μέρος αυτών των εφαρμογών αποτελούν και οι εφαρμογές προσομοίωσης συστημάτων πυρηνικής απεικόνισης.

Επομένως ήταν οι παραπάνω εξελίξεις που ενέπνευσαν τα ιδρυτικά μέλη της OpenGATE Collaboration να αναπτύξουν μια εργαλειοθήκη λογισμικού προσομοίωσης που να συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο διαφορετικών κατηγοριών αλγορίθμων έως εκείνη την περίοδο. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε άμεσα μια πλατφόρμα Monte Carlo για τομογραφία εκπομπής η οποία έχει την δυνατότητα από την μια να μοντελοποιεί κινητικά χαρακτηριστικά πηγής, deadtime και κίνηση και από την άλλη να επωφελείται από την ευελιξία, προσαρμοστικότητα και ευρεία υποστήριξη των αλγορίθμων γενικού σκοπού. Στην συνέχεια

τα μέλη της ομάδας OpenGATE Collaboration αποφάσισαν να επεκταθούν και να αναλάβουν την συντήρηση και βελτιστοποίηση του GATE καθώς και την ανάπτυξη νέων χαρακτηριστικών και δυνατοτήτων τις οποίες θα ενσωμάτωναν στο GATE μετά από μια διαδικασία αξιολόγησης, δοκιμών και επικύρωσης. Έτσι νέες μονάδες μοντελοποίησης και επεκτάσεις των ορισμών των προηγούμενων εκδόσεων προστίθενται συνεχώς σε κάθε νέα έκδοση με στόχο την προσομοίωση της επίδρασης κάθε πιθανού παράγοντα που υπεισέρχεται σε ένα πείραμα που σχετίζεται με ένα συγκεκριμένο κάθε φορά σύστημα απεικόνισης. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ακόμα καλύτερη συμφωνία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Ο ορισμός ενός μέρους των καινούργιων σε κάθε έκδοση παραμέτρων καθίσταται υποχρεωτικός στην περίπτωση που αυτές οι παράμετροι αποδειχθούν ότι επιδρούν σημαντικά στην ποιότητα του τελικού σήματος εξόδου και δεν υπάρχει τρόπος υπολογισμού τους απευθείας από το σύστημα. Για τις περισσότερες καινούργιες παραμέτρους όμως δεν ισχύει τουλάχιστον μια από τις δύο παραπάνω προϋποθέσεις και επομένως ο ορισμός τους καθίσταται προαιρετικός. Ο καθορισμός κάθε προαιρετικής παραμέτρου εναπόκειται στον βαθμό ακρίβειας που τίθεται κάθε φορά ως ελάχιστη προδιαγραφή. Κάθε προδιαγραφή, με την σειρά της, αντιστοιχεί και σε ένα σύνολο εφαρμογών. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής οι προδιαγραφές μπορεί να είναι είτε υψηλού είτε χαμηλού επιπέδου. Εάν δεν καθορίσει ο ίδιος ο χρήστης κάποια συγκεκριμένη τιμή, τότε αυτόματα ανατίθεται μια προκαθορισμένη τιμή ή μια τιμή που προέκυψε από έναν κρυφό (μη ορατό στον χρήστη) υπολογισμό του GATE και η οποία συνήθως αντιστοιχεί σε μια προδιαγραφή μέτριου επιπέδου. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται αναλυτικά οι ορισμοί όλων των παραμέτρων όλων των μονάδων προσομοίωσης που χρησιμοποιούν οι αρχικές εκδόσεις του GATE. Για την πληρότητα όμως της παρουσίασης καθώς και για την ανάδειξη των μεθοδολογιών με τις οποίες μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε περισσότερο ένα σύστημα τομογραφικής απεικόνισης, παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5 οι νέες δυνατότητες που προσφέρει το GATE αποσκοπώντας τόσο στην υποστήριξη μιας μεγαλύτερης ποικιλίας τεχνολογιών τομογραφίας εκπομπής όσο και στην ακριβέστερη προσομοίωση ενός δεδομένου συστήματος. Η παρουσίαση των νέων χαρακτηριστικών αφορά συνήθως ένα συγκεκριμένο τμήμα της προσομοίωσης που σχετίζεται με την ηλεκτρονική απόκριση των ανιχνευτών ενός συστήματος το οποίο έχει και τον μεγαλύτερο βαθμό πολυπλοκότητας και ονομάζεται ψηφιοποιητής (*digitizer*). Ο ψηφιοποιητής υλοποιείται ως μια αλυσίδα διαδοχικών μονάδων επεξεργασίας σήματος στην οποία ο χρήστης μπορεί να δημιουργεί και να αφαιρεί μονάδες όπως επίσης και να τις συνδέει με διάφορους τρόπους. Λόγω της πολυπλοκότητας του συγκεκριμένου τμήματος υπάρχει μεγάλη ευελιξία χειρισμού των δεδομένων. Τα βασικά χαρακτηριστικά του *digitizer* έχουν περιγραφεί στην παράγραφο 3.10 του 3^{ου} κεφαλαίου.

Η αναζήτηση της πιο αποδοτικής και οικονομικής σε χρόνο και αξία διαχείρισης δεδομένων αποτελεί βασικό αντικείμενο της σύγχρονης έρευνας στον τομέα της ανάπτυξης ιατρικών απεικονιστικών συστημάτων. Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι η δυνατότητα της προσομοίωσης της πραγματικής ηλεκτρονικής απόκρισης των ανιχνευτών με όσο το δυνατόν περισσότερη ακρίβεια θα συνέβαλλε καθοριστικά και στην γρήγορη και αποτελεσματική βελτιστοποίηση της. Άλλωστε η εξέλιξη της τεχνολογίας προσομοιώσεων είναι αλληλένδετη με την εξέλιξη στον τομέα της ανάπτυξης ιατρικών συστημάτων τομογραφίας εκπομπής.

5.2 Εξέλιξη και νέες δυνατότητες του GATE.

Οι καινούργιες εκδόσεις του GATE που θα δημοσιευτούν αυτήν την περίοδο προσφέρουν ένα σύνολο νέων επιλογών στον χρήστη του GATE προσδίδοντας τις προσομοιώσεις μεγαλύτερη ευελιξία και ακρίβεια.

Οι σημαντικότερες προσθήκες και βελτιώσεις αφορούν το τμήμα του *digitizer* καθώς προστέθηκαν νέες μονάδες ψηφιοποίησης και αναβαθμίστηκαν κάποιες που υπήρχαν ήδη. Αυτές οι νέες δυνατότητες θα περιγραφούν και θα αναλυθούν στην συνέχεια αυτής της παραγράφου, χωρίς όμως να εφαρμοστούν στην προσομοίωση του συστήματος HR+ που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4. Σκοπός της περιγραφής των νέων χαρακτηριστικών είναι να μελετήσουμε τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να συμβάλλουν τόσο στην πληρέστερη

μοντελοποίηση προσφάτων και μελλοντικών συστημάτων τομογραφίας εκπομπής όσο και στην επικύρωση των αποτελεσμάτων μιας προσομοίωσης με πραγματικά πειραματικά δεδομένα.

Βέβαια άλλο ένας τμήμα του πακέτου προσομοίωσης το οποίο είναι πολύ σημαντικό και επιδέχεται καθοριστικές βελτιώσεις είναι ο τρόπος ορισμού και επεξεργασίας ενός διακριτοποιημένου phantom και μιας αντίστοιχης πηγής όπως εκείνης που απεικονίζεται στην εισαγωγική εικόνα αυτού του κεφαλαίου. Το χαρακτηριστικό που πρέπει άμεσα να βελτιωθεί σε αυτή την περίπτωση είναι ο πολύ μεγάλος υπολογιστικός χρόνος που απαιτεί το GATE για την επεξεργασία διακριτοποιημένων αντικειμένων.

5.2.1 Βελτιώσεις του τμήματος ψηφιοποίησης (digitizer)

Όπως περιγράψαμε στα προηγούμενα κεφάλαια το τμήμα του *digitizer* στις προσομοιώσεις στο GATE είναι καθοριστικό για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και την όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση των δεδομένων της προσομοίωσης με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Ο *digitizer* αναλαμβάνει την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς της ηλεκτρονικής απόκρισης των ανιχνευτών του συστήματος και επομένως περιλαμβάνει την προσομοίωση όλου του ηλεκτρονικού συστήματος καταγραφής και συλλογής δεδομένων ενός απεικονιστικού συστήματος τομογραφίας εκπομπής. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζουμε τις νέες δυνατότητες του *digitizer*.

5.2.1.1 Κατανομές (Distributions)

Εφόσον πολλές από τις μονάδες του *digitizer* σχετίζονται με συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας, σχεδιάστηκε ένα καινούργιο γενικό εργαλείο για την περιγραφή τέτοιων μαθηματικών αντικειμένων στο GATE. Συγκεκριμένα μια κατανομή στο GATE ορίζεται από το όνομά της, το είδος της (Gaussian, Exponential κτλ...) και από τις ειδικές παραμέτρους κάθε είδους κατανομής (όπως είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για μια κατανομή Gauss). Ανάλογα με την περίπτωση αυτά τα αντικείμενα χρησιμοποιούνται είτε άμεσα ως συναρτήσεις είτε ως πυκνότητες πιθανότητας στις οποίες μια μεταβλητή επιλέγεται τυχαία. Στις ακόλουθες παραγράφους ο γενικός όρος *distribution* θα χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή και των δύο κατηγοριών αντικειμένων, εφόσον ο ορισμός του όρου αυτού είναι μοναδικός στα πλαίσια του περιβάλλοντος του GATE.

Πέντε είδη κατανομών (*distributions*) είναι διαθέσιμα στο GATE.

- Επίπεδες κατανομές (flat distributions), οι οποίες ορίζονται από το εύρος στο οποίο η συνάρτηση δεν είναι μηδενική και από την τιμή που λαμβάνει η συνάρτηση στο συγκεκριμένο εύρος
- Κατανομές Gauss που ορίζονται από την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση
- Εκθετικές κατανομές (Exponential distributions) που ορίζονται από την ισχύ τους
- Τεχνητές κατανομές (manual distributions) που ορίζονται από ένα διακριτό σύνολο σημείων που καθορίζεται από τον χρήστη σε ένα αρχείο μακροεντολών. Στην συνέχεια τα δεδομένα αυτά παρεμβάλλονται γραμμικά (linear interpolation) για τον ορισμό της συνάρτησης σε συνεχές πεδίο ορισμού.
- Κατανομή αρχείων (file distribution) που λειτουργεί ως τεχνητή κατανομή, με την διαφορά ότι τα σημεία ορίζονται σε ένα ξεχωριστό αρχείο ASCII του οποίου το όνομα εισάγεται ως παράμετρος. Η τελευταία μέθοδος είναι προσαρμοσμένη για μεγάλο αριθμό σημείων και επιτρέπει την περιγραφή οποιασδήποτε κατανομής με μια εντελώς γενική και ανεξάρτητη μεθοδολογία.

Μια κατανομή ορίζεται με τον καθορισμό του ονόματός της και στην συνέχεια του είδους της. Για παράδειγμα

```
/gate/distributions/name my_distrib  
/gate/distributions/insert Gaussian
```

Οι πιθανές ονομασίες τύπων κατανομών που είναι διαθέσιμες αντιστοιχούν στα πέντε είδη κατανομών που περιγράψαμε παραπάνω και τα οποία είναι: Flat, Gaussian, Exponential, Manual ή File
Μόλις δημιουργηθεί η κατανομή ρυθμίζονται οι σχετικές παράμετροι

```
/gate/distributions/my_distrib/setMean 350 keV
/gate/distributions/my_distrib/setSigma30 keV
```

Για το παράδειγμα της κατανομής Gauss. Όλες οι παράμετροι, για κάθε τύπο κατανομής παρουσιάζονται περιληπτικά στον πίνακα 5.1

5.2.1.2 Μονάδα Θορύβου (Noise)

Διάφορες πηγές θορύβου στο παρασκήνιο (background noise) μπορούν να προκύψουν σε μια αρχιτεκτονική PET ή SPECT. Για παράδειγμα τα ηλεκτρονικά συστήματα μπορούν να εισάγουν τον δικό τους θόρυβο ή ορισμένα είδη κρυστάλλων που χρησιμοποιούνται ως ανιχνευτές, όπως για παράδειγμα το LSO, περιέχουν ραδιενεργούς πυρήνες που ίσως συμμετέχουν παρασκηνιακά στον ρυθμό μέτρησης ανιχνεύσεων (detection count rate) του συστήματος. Μέσα στο GATE έχει προβλεφθεί ο ορισμός της μονάδας θορύβου (noise module) του *digitizer* που αποσκοπεί στην προσθήκη τέτοιου είδους event στο παρασκήνιο με έναν εντελώς γενικό τρόπο έτσι ώστε να προσομοιώνεται κάθε είδους πηγή θορύβου. Για να επιτευχθεί η προσομοίωση αυτή, η ενέργεια όπως επίσης και το χρονικό διάλειμμα μεταξύ συμβάντων επιλέγονται τυχαία, για κάθε συμβάν, σύμφωνα με κατανομές ορισμένες από τον χρήστη χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Στο επόμενο παράδειγμα εισάγουμε μια πηγή θορύβου της οποίας η ενέργεια κατανέμεται σύμφωνα με τον νόμο του Gauss ενώ η κατανομή του χρόνου ακολουθεί μια διαδικασία Poisson. Αρχικά πρέπει να ορίσουμε τις δύο κατανομές. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζουμε από την θεωρία πιθανοτήτων πως εάν η πιθανότητα ανίχνευσης k events σε ένα χρονικό

διάλειμμα διάρκειας t κατανέμεται σύμφωνα με τον νόμο Poisson $P_1(k, t) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^k}{k!}$,

τότε η πυκνότητα πιθανότητας να έχουμε ένα χρονικό διάλειμμα στο χρονικό διάστημα $[t; t + dt]$ μεταξύ δύο διαδοχικών events δίνεται από την σχέση $dP_2(t) = \lambda e^{-\lambda t} dt$. Επομένως αφού η κατανομή θορύβου χρησιμοποιεί την κατανομή του χρονικού διαλείμματος μεταξύ δύο διαδοχικών συμβάντων θα πρέπει να ορίσουμε μια εκθετική κατανομή.

```
/gate/distributions/name energy_distrib
/gate/distributions/insert Gaussian
/gate/distributions/energy_distrib/setMean 450 keV
/gate/distributions/energy_distrib/setSigma 1 keV
/gate/distributions/name dt_distrib
/gate/distributions/insert Exponential
/gate/distributions/dt_distrib/setLambda 7.57 mus
/gate/digitizer/Singles/insert noise
/gate/digitizer/Singles/noise/setDeltaTDistribution dt_distrib
/gate/digitizer/Singles/noise/setEnergyDistribution energy_distrib
```

Το ειδικό αναγνωριστικό -2 (event_ID=-2) δεσμεύεται για τον χαρακτηρισμό των events που προέρχονται από θόρυβο.

5.2.1.3 Τοπικός Βαθμός Απόδοσης (Local Efficiency)

Οι διαφορετικοί κρύσταλλοι ή οι διαφορετικές ομάδες κρυστάλλων που συνιστούν ένα σύστημα PET ή SPECT μπορούν να χαρακτηριστούν από τον δικό τους βαθμό απόδοσης (*local*

efficiency). Η νέες εκδόσεις του GATE προσφέρουν την δυνατότητα περιγραφής αυτής της απόδοσης ανά κρύσταλλο ή ανά αντικείμενο που θα καθορίσει ο χρήστης.

Για να οριστεί η κατανομή της αποτελεσματικότητας (*efficiency distribution*) στο σύστημα που προσομοιώνεται θα πρέπει να προσδιοριστεί ποιο επίπεδο της ιεραρχίας αντικειμένων διαφοροποιείται. Στην συνέχεια η κατανομή της αποτελεσματικότητας για κάθε διαφοροποιημένο αντικείμενο καθορίζεται από μια γενική κατανομή σύμφωνα με όσα αναπτύχθηκαν στην παράγραφο των κατανομών προηγουμένως.

Στο ακόλουθο παράδειγμα, υποθέτουμε ότι το σύστημά μας αποτελείται από 8 blocks (*level1*) με 64 κρυστάλλους ο καθένας (*level2*). Το πρώτο παράδειγμα δείχνει πως καθορίζουμε ένα συγκεκριμένο βαθμό λειτουργικής αποτελεσματικότητας ανά block, η οποία έχει οριστεί σε ένα αρχείο με όνομα *eff_per_block.dat* και το οποίο περιέχει 8 τιμές (μία για κάθε block).

```
/gate/distributions/name block_eff_distrib
/gate/distributions/insert File
/gate/distributions/block_eff_distrib/autoX true
/gate/distributions/block_eff_distrib/setFileName eff_per_block.dat
/gate/distributions/block_eff_distrib/read
```

```
/gate/digitizer/Singles/insert localEfficiency
/gate/digitizer/Singles/localEfficiency/enableLevel 1
/gate/digitizer/Singles/localEfficiency/disableLevel 2
/gate/digitizer/Singles/localEfficiency/setEfficiency
block_eff_distrib
```

Στο δεύτερο παράδειγμα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο καθορίζουμε τον διαφορετικό βαθμό απόδοσης για κάθε κρύσταλλο μέσα σε ένα block. Η κατανομή του *efficiency* μέσα στο block επαναλαμβάνεται στην συνέχεια για όλα τα blocks. Έτσι ορίζεται μια φόρμα από 64 τιμές *efficiency* στο αρχείο *eff_within_block.dat*

```
/gate/distributions/name within_block_eff_distrib
/gate/distributions/insert File
/gate/distributions/within_block_eff_distrib/autoX true
/gate/distributions/within_block_eff_distrib/setFileName
eff_within_block.dat
/gate/distributions/within_block_eff_distrib/read
```

```
/gate/digitizer/Singles/insert localEfficiency
/gate/digitizer/Singles/localEfficiency/disableLevel 1
/gate/digitizer/Singles/localEfficiency/enableLevel 2
/gate/digitizer/Singles/localEfficiency/setEfficiency
within_block_eff_distrib
```

Τέλος στο τρίτο παράδειγμα κάθε κρύσταλλος έχει την δική του τιμή *efficiency* η οποία περιγράφεται στο αρχείο *eff_per_crystal.dat* το οποίο τώρα θα περιέχει προφανώς 8×64 στοιχεία.

```
/gate/distributions/name crystal_eff_distrib
/gate/distributions/insert File
/gate/distributions/crystal_eff_distrib/autoX true
/gate/distributions/crystal_eff_distrib/setFileName
eff_per_crystal.dat
/gate/distributions/crystal_eff_distrib/read
```

```
/gate/digitizer/Singles/insert localEfficiency
/gate/digitizer/Singles/localEfficiency/enableLevel 1
/gate/digitizer/Singles/localEfficiency/enableLevel 2
```

```
/gate/digitizer/Singles/localEfficiency/setEfficiency  
crystal_eff_distrib
```

5.2.2 Ενταμιευτές μνήμης (memory buffers) και εύρος ζώνης (bandwidth)

Για την μοντελοποίηση της επίδρασης του περιορισμένου ρυθμού μετάδοσης (limited transfer rate) σχεδιάστηκε μια μονάδα που επιτρέπει την προσομοίωση της απώλειας δεδομένων λόγω υπερχείλισης (overflow) του ενταμιευτή μνήμης (memory buffer). Αυτό επιτυγχάνεται με την περιοδική ανάγνωση των δεδομένων με βάση ορισμένη συχνότητα ανάγνωσης. Η μονάδα αυτή χρησιμοποιεί δύο παραμέτρους, την συχνότητα ανάγνωσης (reading frequency) ν και το μήκος του ενταμιευτή ή αλλιώς βάθος μνήμης D . Επιπλέον μπορούν να μοντελοποιηθούν δύο μέθοδοι ανάγνωσης: η μέθοδος ανάγνωσης ανά event (event per event basis) στην οποία διαβάζεται ένα event για κάθε παλμό του ρολογιού ανάγνωσης) και η μέθοδος ανάγνωσης ολόκληρου του ενταμιευτή (full buffer reading basis) στην οποία διαβάζεται και στην συνέχεια αδειάζει όλο το περιεχόμενο του ενταμιευτή σε κάθε παλμό του ρολογιού ανάγνωσης. Στην πρώτη μέθοδο ανάγνωσης το όριο ρυθμού δεδομένων περιορίζεται στην τιμή ν ενώ στην δεύτερη μέθοδο το αντίστοιχο όριο είναι ίσο με το γινόμενο $D \cdot \nu$. Όταν φτάσουμε στο όριο μεγέθους μνήμης τότε κάθε νέος παλμός απορρίπτεται έως την άφιξη του επόμενου παλμού του ρολογιού ανάγνωσης αφού τότε θα ελευθερωθεί ένα μέρος του ενταμιευτή. Σε αυτήν την περίπτωση ένα μη μηδενικό μήκος ενταμιευτή επιτρέπει την αντιμετώπιση μιας τοπικής αύξησης του ρυθμού άφιξης δεδομένων.

Για να ορίσουμε έναν ενταμιευτή που να διαβάζει με συχνότητα 10MHz και με μήκος 64 events χρησιμοποιώντας την μέθοδο ανάγνωσης ολόκληρου του ενταμιευτή ανά παλμό ρολογιού χρησιμοποιούμε τις ακόλουθες εντολές

```
/gate/digitizer/Your_Single_chain/insert buffer  
/gate/digitizer/Your_Single_chain/buffer/setBufferSize 64 B  
/gate/digitizer/Your_Single_chain/buffer/setReadFrequency 10 MHz  
/gate/digitizer/Your_Single_chain/buffer/setMode 1
```

Η αλυσίδα `Your_Single_chain` μπορεί να αποτελεί την προκαθορισμένη αλυσίδα `Singles` ή οποιαδήποτε αλυσίδα από `Singles` που όρισε ο χρήστης.

Το μέγεθος του ενταμιευτή αντιπροσωπεύει τον αριθμό των στοιχείων, στην περίπτωση αυτή 64 `Singles`, που μπορούν να αποθηκευτούν στον ενταμιευτή.

Εάν επιλέγαμε την μέθοδο ανάγνωσης event ανά event τότε θα πρέπει να δίνουμε μηδενική τιμή στην παράμετρο `setMode` της τελευταίας γραμμής εντολών παραπάνω (`setMode=0`).

5.2.2.1 Στοίβαγμα (Pile-up)

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό ενός ανιχνευτή είναι ο χρόνος απόκρισής του, που ορίζεται ως ο απαιτούμενος χρόνος για έναν ανιχνευτή για να σχηματίσει το σήμα μετά την άφιξη της ακτινοβολίας σε αυτόν. Η διάρκεια του σήματος είναι εξίσου σημαντική. Εάν κατά την διάρκεια αυτού του διαστήματος μπορεί να γίνει δεκτό και ένα δεύτερο event τότε το δεύτερο σήμα θα στοιβαχθεί (*pile-up*) πάνω στο πρώτο. Ο παλμός που θα προκύψει θα είναι ένας συνδυασμός των δύο σημάτων, όσον αφορά την ενέργεια και τον χρόνο. Εάν N παλμοί εισέρχονται μέσα στο χρονικό παράθυρο του ίδιου *sensitive* αντικειμένου (το οποίο ορίζεται από την παράμετρο *depth* του επιπέδου του συστήματος) τότε ο παλμός εξόδου θα είναι ένας παλμός με ενέργεια εξόδου που ορίζεται από το άθροισμα των ενεργειών των εισερχόμενων παλμών ($E_{out} = \sum_{i=0}^N E_i$) και με χρόνο ίσο με την τελευταία χρονική στιγμή του τελευταίου παλμού που συμμετείχε στο στοίβαγμα, δηλαδή $t_{out} = t_N$.

Εφόσον με την επίδραση του *pile-up* τα πολλαπλά events ομαδοποιούνται εκ νέου σε ένα μοναδικό event, θα πρέπει να θεωρηθεί το *pile-up* ως αφαίρεση εκείνων των events τα οποία συμβαίνουν σε μια δεδομένη χρονική διάρκεια. Έτσι η επίδραση του *pile-up* είναι αντίστοιχη με

την επίδραση του *dead time*. Επιπλέον, αφού ο χρόνος λήξης της επίδρασης του *pile-up* ανανεώνεται κάθε φορά που συμβαίνει ένα *Single* μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει συγκεκριμένα το *paralysable* μοντέλο του *dead time*.

Για να δηλωθεί η απόκριση *pile-up* που αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια 100ns για τον σχηματισμό του παλμού και η οποία πραγματοποιείται στην μονάδα που αντιστοιχεί σε ομαδοποίηση κρυστάλλων στο τέταρτο επίπεδο ενός συστήματος θα πρέπει να εισάγουμε το παρακάτω σύνολο εντολών

```
/gate/digitizer/Singles/insert pileup
/gate/digitizer/Singles/pileup/setDepth 4
/gate/digitizer/pileup/setPileup 100 ns
```

5.2.3 Πολλαπλές αλυσίδες επεξεργασίας

Η χρήση πολλαπλών αλυσίδων επεξεργαστών (multiple processor chains) στο τμήμα του *digitizer* επιτρέπει μέγιστη ευελιξία στην σχεδίαση του *digitizer* και του συστήματος δεδομένων εξόδου. Ο διαχειριστής των μονάδων επεξεργασίας παλμών ονομάζεται *GatePulseProcessorChain* και διαθέτει έναν αγγελιοφόρο (messenger) που ονομάζεται *GatePulseProcessorChainMessenger*. Όλα τα στοιχεία του *digitizer* αποθηκεύονται σε μια προκαθορισμένη αλυσίδα επεξεργαστών που είναι η

digitizer/Singles

Όμως μπορούν να δημιουργηθούν νέες αλυσίδες επεξεργαστών που να προσδιορίζουν η κάθε μια την προέλευση των δεδομένων τους. Για παράδειγμα, η επόμενη ακολουθία εντολών θα παράγει τρία είδη εξόδων:

- "Singles" με κανένα ενεργειακό περιορισμό
- "LESingles" με ένα χαμηλό-ενεργειακό παράθυρο
- "HESingles" με ένα υψηλό-ενεργειακό παράθυρο

Τα στοιχεία της προκαθορισμένης αλυσίδας επεξεργαστών ("digitizer/Singles") πρέπει να προσδιορίζονται από το επόμενο σύνολο εντολών για μια τυπική αλυσίδα επεξεργαστών ενός συστήματος PET (με κρυστάλλους BGO)

```
/gate/digitizer/Singles/insert adder
/gate/digitizer/Singles/insert readout
/gate/digitizer/Singles/readout/setDepth 1
```

Στην συνέχεια για να προσθέσουμε το φίλτρο *blurring* στον κλάδο των "Singles" θα εισάγουμε τις εντολές

```
/gate/digitizer/Singles/insert blurring
/gate/digitizer/Singles/blurring/setResolution 0.26
/gate/digitizer/Singles/blurring/setEnergyOfReference 511. keV
```

Οι επόμενες εντολές δημιουργούν έναν κλάδο αλυσίδας χαμηλών ενεργειών που προέρχεται από την έξοδο της προκαθορισμένης αλυσίδας "Singles"

```
/gate/digitizer/name LESingles
/gate/digitizer/insert singleChain
/gate/digitizer/LESingles/setInputName Singles
/gate/digitizer/LESingles/insert thresholder
/gate/digitizer/LESingles/thresholder/setThreshold 50. keV
/gate/digitizer/LESingles/insert upholder
/gate/digitizer/LESingles/upholder/setUphold 350. keV
```

Οι παρακάτω εντολές δημιουργούν έναν κλάδο αλυσίδας υψηλών ενεργειών προερχόμενο από την αλυσίδα "Singles"

```
/gate/digitizer/name HESingles  
/gate/digitizer/insert singleChain  
/gate/digitizer/HESingles/setInputName Singles  
/gate/digitizer/HESingles/insert thresholder  
/gate/digitizer/HESingles/thresholder/setThreshold 350. keV  
/gate/digitizer/HESingles/insert upholder  
/gate/digitizer/HESingles/upholder/setUphold 650. keV
```

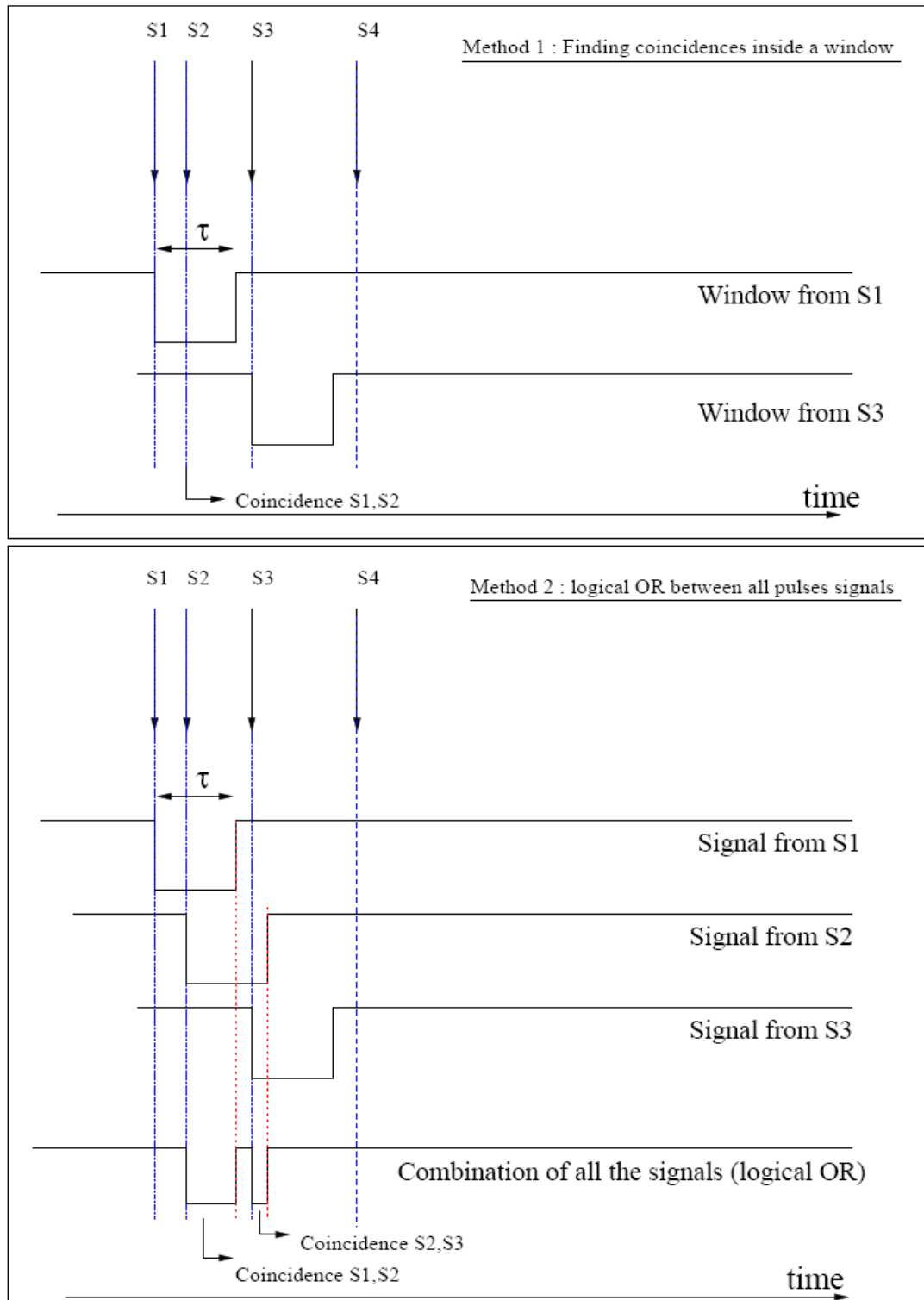
5.2.4 Ταξινόμηση συμπτώσεων

Όπως αναπτύχθηκε και στην παράγραφο 3.10.2 ο ταξινομητής συμπτώσεων αναζητά, στον κατάλογο των *Singles* για ζεύγη συμπτωτικών *Singles*. Όταν δύο ή περισσότερα *Singles* βρεθούν στο ίδιο παράθυρο σύμπτωσης, τότε ομαδοποιούνται για να σχηματίζουν ένα συμβάν σύμπτωσης (*coincidence event*). Εδώ θα περιγράψουμε τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιούν οι νέες εκδόσεις του GATE για την εύρεση των συμπτωτικών *Singles*. Στην πρώτη μέθοδο, όταν ανιχνεύεται ένα *single*, το GATE ανοίγει ένα νέο παράθυρο σύμπτωσης και αναζητά για ένα δεύτερο *single* που θα συμβεί κατά την διάρκεια του χρονικού παραθύρου. Σε αυτήν την μέθοδο με την προϋπόθεση ότι το χρονικό παράθυρο δεν έχει κλείσει κανένα άλλο *single* δεν μπορεί να ανοίξει το δικό του χρονικό παράθυρο. Στην δεύτερη μέθοδο, όλα τα *singles* ανοίγουν τα δικά τους χρονικά παράθυρα σύμπτωσης και στην συνέχεια εφαρμόζεται η λογική πράξη OR μεταξύ όλων των ανεξάρτητων σημάτων για να εντοπιστούν τα *coincidences*. Και οι δύο μεθοδολογίες είναι διαθέσιμες στο GATE και μπορούν να οδηγήσουν σε ελαφρώς διαφορετικά αποτελέσματα για δεδομένο εύρος παραθύρου σύμπτωσης. Μια σύγκριση της διαφοράς αυτών των δύο συμπεριφορών παρουσιάζεται στην εικόνα 5.1

5.2.4.1 Καθυστερημένες συμπτώσεις (*delayed coincidences*)

Κάθε *Single* που εκπέμπεται από ένα συγκεκριμένο σωματίδιο πηγής αποθηκεύεται με ένα αναγνωριστικό συμβάντος που ονομάζουμε *eventID* και το οποίο καθορίζει μονοσήμαντα την αποδιέγερση από την οποία προήλθε το *single*. Εάν οι αριθμοί των δύο *eventID* δεν ταυτίζονται σε ένα *coincidence event* τότε το event αυτό ορίζεται ως τυχαία σύμπτωση (*Random coincidence*)

Μια πειραματική μέθοδος που εφαρμόζεται για την εκτίμηση του αριθμού των τυχαίων *coincidences* χρησιμοποιεί ένα καθυστερημένο παράθυρο σύμπτωσης (*delayed coincidence window*). Η προκαθορισμένη επιλογή στο GATE αφορά το άνοιγμα ενός παραθύρου σύμπτωσης όταν ένα σωματίδιο ανιχνευθεί (για παράδειγμα όταν δημιουργηθεί ένα *Single*). Στην μέθοδο όμως του καθυστερημένου παραθύρου, ένα δεύτερο παράθυρο σύμπτωσης δημιουργείται παράλληλα με το κανονικό παράθυρο σύμπτωσης (το οποίο στην περίπτωση αυτή ονομάζεται άμεσο παράθυρο -*prompt coincidence window*). Το δεύτερο παράθυρο (συνήθως με το ίδιο εύρος) είναι ανοικτό αλλά μετατοπισμένο στο χρόνο. Αυτή η μετατόπιση θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για να διασφαλίζει ότι τα δύο σωματίδια που ανιχνεύθηκαν στο εσωτερικό της προέρχονται από δύο διαφορετικές αποδιεγέρσεις. Έτσι ο τελικός αριθμός των συμπτώσεων που ανιχνεύονται στο καθυστερημένο παράθυρο προσεγγίζει τον αριθμό των τυχαίων events που υπολογίζονται στο παράθυρο αναμονής. Το GATE προσφέρει την δυνατότητα να καθοριστεί μια τιμή μετατόπισης για τον ταξινομητή συμπτώσεων έτσι ώστε οι γραμμές σύμπτωσης που αντιστοιχούν στα καθυστερημένα *coincidence* να μπορούν να προσομοιωθούν.



Εικόνα 5.1: Σύγκριση μεταξύ των δύο μεθοδολογιών εύρεσης coincidences για μια δεδομένη ακολουθία από singles. Στην πρώτη μέθοδο (άνω εικόνα) το S2 single δεν ανοίγει το δικό του χρονικό παράθυρο αφού ο χρόνος άφιξής του βρίσκεται εντός του χρονικού παραθύρου που άνοιξε το S1. Έτσι με αυτήν την μέθοδο δημιουργείται μόνο ένα coincidence μεταξύ S1 και S2. Από την άλλη πλευρά με την χρήση της δεύτερης μεθόδου, όπου όλα τα singles ανοίγουν τα χρονικά παράθυρα σύμπτωσής τους, βρέθηκαν, για την ίδια διαδοχή από singles, δύο διαφορετικά coincidences.

5.2.4.2 Πολλαπλές συμπτώσεις (multiple coincidences)

Όταν περισσότερα από δύο *singles* βρεθούν σε σύμπτωση, μπορούν να υλοποιηθούν στην προσομοίωση πολλοί διαφορετικοί τύποι συμπεριφοράς του συστήματος. Αποσκοπώντας στην κάλυψη ενός μεγάλου εύρους εφαρμογών, το GATE επιτρέπει την επιλογή ανάμεσα από εννέα (9) διαφορετικούς κανόνες για να εφαρμόσει σε τέτοιες περιπτώσεις. Ο κατάλογος των κανόνων μαζί με την επεξήγησή τους δίνεται στον πίνακα 5.1 ενώ η σύγκριση των επιδράσεων της εφαρμογής κάθε κανόνα για διάφορες περιπτώσεις πολλαπλών συμπτώσεων παρουσιάζεται στην εικόνα 5.2

Όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 3.10.2 η ρύθμιση ενός παραθύρου σύμπτωσης των 10ns φαίνεται με την εντολή

```
/gate/digitizer/Coincidences/setWindow 10. ns
```

Για την μεταβολή της προκαθορισμένης τιμής 2 (default value=2) της ελάχιστης διαφοράς αριθμών block για τον προσδιορισμό των ορθών *coincidence* χρησιμοποιούμε την εντολή

```
/gate/digitizer/Coincidences/minSectorDifference <number>
```

Η προκαθορισμένη τιμή μετατόπισης (offset) είναι ίση με το μηδέν (0). Και αντιστοιχεί στο άμεσο χρονικό παράθυρο (prompt window). Εάν επιθυμούμε την προσομοίωση ενός καθυστερημένου χρονικού παραθύρου, με μετατόπιση 100ns χρησιμοποιούμε την εντολή

```
/gate/digitizer/Coincidences/setOffset 100. ns
```

Έπειτα για τον καθορισμό του βάθους στην ιεραρχία των επιπέδων του συστήματος κάτω από την οποία θα δημιουργηθούν τα *coincidences* χρησιμοποιούμε την εντολή

```
/gate/digitizer/Coincidences/setDepth <system's depth (1 by default)>
```

Τέλος η πολιτική που θα εφαρμοστεί για τον χειρισμό πολλαπλών *coincidence* καθορίζεται από την εντολή

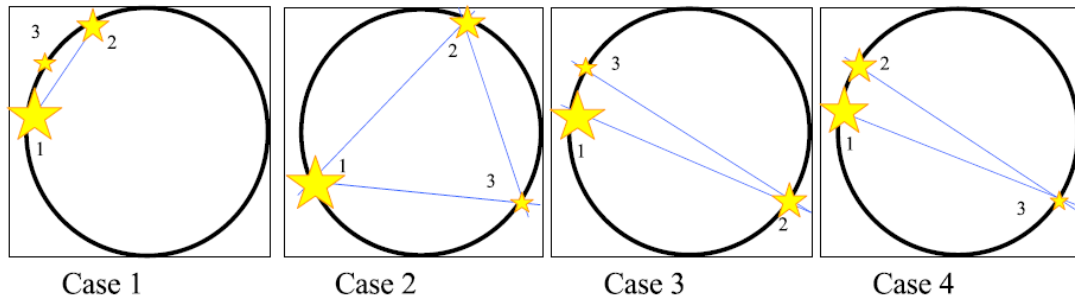
```
/gate/digitizer/Coincidences/setMultiplePolicy <policyName>
```

<i>Policy Name</i>	<i>Description</i>
takeAllGoods	Κάθε καλό υπό-ζεύγος αποθηκεύεται
takeWinnerOfGoods	Μόνο το καλό υπό-ζεύγος με την υψηλότερη ενέργεια αποθηκεύεται
takeWinnerIfIsGood	Εάν το υπό-ζεύγος με την υψηλότερη ενέργεια είναι καλό, αποθήκευσέ το, αλλιώς απόρριψε το <i>event</i>
keepIfOnlyOneGood	Εάν ακριβώς ένα υπό-ζεύγος είναι καλό, διατήρησε το πολλαπλό <i>coincidence</i>
keepIfAnyIsGood	Εάν τουλάχιστον ένα υπό-ζεύγος είναι καλό, διατήρησε το πολλαπλό <i>coincidence</i>
keepIfAllAreGoods	Ένα όλα τα υπό-ζεύγη είναι καλά, διατήρησε το πολλαπλό <i>coincidence</i>
killAllIfMultipleGoods	Εάν περισσότερο από ένα υπό-ζεύγη είναι καλά, το <i>event</i> αντιμετωπίζεται ως «πολλαπλό» και έτσι απορρίπτονται όλα τα <i>event</i>
killAll	Κανένα πολλαπλό <i>coincidence</i> δεν γίνεται αποδεκτό, ανεξάρτητα από τον αριθμό των καλών υπό-ζευγών που υπάρχουν

Πίνακας 5.1 : Πίνακας των διαθέσιμων πολιτικών χειρισμού πολλαπλών συμπτώσεων (*multicoincidences*) μαζί με την περιγραφή τα λειτουργικότητας κάθε πολιτικής. Όταν το GATE χειρίζεται μια *coincidence* με n ζεύγη, τότε αυτή διαχωρίζεται σε μια λίστα

από όλα τα δυνατά ζεύγη, συνολικά $\frac{n(n-1)}{2}$ υπό-ζεύγη, τα οποία θα αναλυθούν

ξεχωριστά. Στον πίνακα αυτό ο όρος “good” («καλό») σημαίνει ότι ένα υπό-ζεύγος από *singles* αποτελεί *coincidence* και πώς τα δύο *singles* απέχουν έναν αριθμό από *blocks* μεγαλύτερο ή ίσο της παραμέτρου *minSectorDifference* του ταξινομητή συμπτώσεων. Το πρόθεμα “take” σημαίνει ότι ένα ή περισσότερα υπό-ζεύγη *coincidences* θα αποθηκευτούν, ενώ το πρόθεμα “keep” σημαίνει ότι ένα μονοσήμαντο *coincidence*, που αποτελείται από τουλάχιστον τρία *singles* (το οποίο ονομάζουμε πολλαπλό *coincidence* ή *multicoincidence*) θα διατηρηθεί στην ροή των δεδομένων. Στην τελευταία περίπτωση το πολλαπλό *coincidence* δεν θα εγγραφεί στον δίσκο, αλλά ίσως συνεισφέρει στην απώλεια δεδομένων λόγω συμμετοχής του στο φαινόμενο του *deadtime* ή στην κατάληψη τμήματος του εύρους ζώνης (*bandwidth*) του συστήματος. Ο χρήστης μπορεί να απορρίψει τα πολλαπλά *coincidence* σε οποιαδήποτε στάδιο της συλλογής δεδομένων επιθυμεί χρησιμοποιώντας την μονάδα επεξεργασίας *multipleKiller* (θα την περιγράψουμε αργότερα). Τέλος το πρόθεμα “kill” σημαίνει προφανώς ότι όλα τα *event* θα απορριφθούν και δεν θα παράγουν *coincidence*.



Multiple policy	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
takeAllGoods	(1,2)	(1,2) ; (1,3) ; (2,3)	(1,2) ; (2,3)	(1,3) ; (2,3)
takeWinnerOfGoods	(1,2)	(1,2)	(1,2)	(1,3)
takeWinnerIfIsGood	(1,2)	(1,2)	(1,2)	-
takeWinnerIfAllAreGoods	-	(1,2)	-	-
keepIfOnlyOneGood	★	-	-	-
keepIfAnyIsGood	★	★	★	★
keepIfAllAreGoods	-	★	-	-
killAllIfMultipleGoods	(1,2)	-	-	-
killAll	-	-	-	-

Εικόνα 5.2 : Σύγκριση της συμπεριφοράς όλων των διαθέσιμων πολιτικών πολλαπλού χειρισμού για διάφορες περιπτώσεις πολλαπλών συμπτώσεων (*multiple coincidence*). Στην εικόνα, τα αστερία αντιπροσωπεύουν τα *singles* που ανιχνεύτηκαν σε ένα *event*. Το μέγεθος των αστεριών, όπως επίσης ο αριθμός δίπλα τους, υποδηλώνει το επίπεδο ενέργειας κάθε *single*. (δηλ. το *single* νούμερο 1 έχει περισσότερη ενέργεια από το *single* νούμερο 2, το οποίο με την σειρά του έχει περισσότερη ενέργεια από το *single* νούμερο 3). Οι γραμμές υποδηλώνουν τις πιθανές καλές γραμμές σύμπτωσης (δηλ. με μια διάφορα αριθμών *blocks* μεγαλύτερη ή ίση από την τιμή της παραμέτρου *minSectorDifference* του ταξινομητή συμπτώσεων. Στον πίνακα το σύμβολο μείον (-) υποδηλώνει ότι το *event* έχει απορριφθεί (δηλ. δεν έχει σχηματισθεί *coincidence*). Το σύμβολο ★ υποδηλώνει ότι όλα τα *singles* διατηρούνται σε ένα μονοσήμαντο πολλαπλό *coincidence* (*multicoincidence*) το οποίο δεν θα εγγραφεί στον δίσκο, αλλά θα μπορεί να συνεισφέρει στην απώλεια δεδομένων λόγω *deadtime* ή κατάληψης εύρους ζώνης (*bandwidth*). Στις υπόλοιπες περιπτώσεις υποδηλώνεται η λίστα των ζευγών *singles* που θα εγγραφούν στο δίσκο (εκτός εάν αφαιρεθούν αργότερα από την πιθανή εφαρμογή κάποιου φίλτρου στα *coincidences*).

5.2.5 Ταξινόμηση πολλαπλών συμπτώσεων (*multiple coincidence sorter*)

Η ταξινόμηση πολλαπλών συμπτώσεων (*multiple coincidence*) μπορεί να επιτευχθεί στο GATE με την χρήση του ειδικού ταξινομητή πολλαπλών συμπτώσεων (*multiple coincidence sorter*). Για την δημιουργία ενός ταξινομητή πρέπει να καθοριστεί το όνομά του καθώς και μια τοποθεσία για τα εισερχόμενα δεδομένα.

Στο ακόλουθο παράδειγμα δημιουργούνται τρεις νέοι *coincidenceSorter*

- Ένας με πολύ μεγάλο coincidence window

```
/gate/digitizer/name LongCoincidences  
/gate/digitizer/insert coincidenceSorter  
/gate/digitizer/LongCoincidences/setInputName Singles  
/gate/digitizer/LongCoincidences/setWindow 1000. ns
```

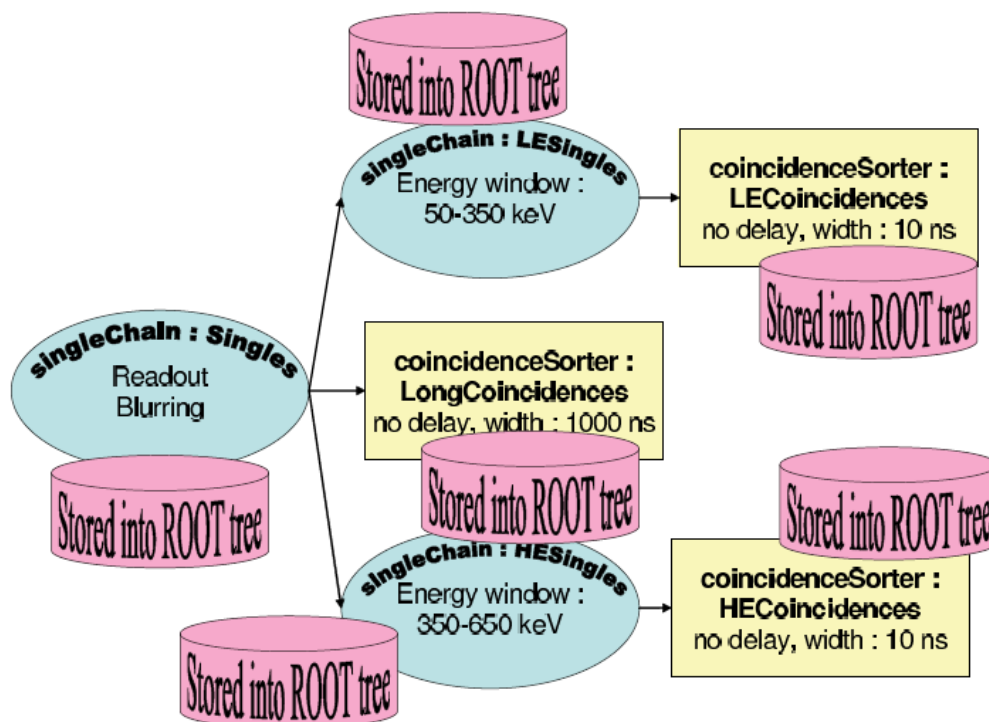
- Ένας για Singles χαμηλών ενεργειών

```
/gate/digitizer/name LECoincidences  
/gate/digitizer/insert coincidenceSorter  
/gate/digitizer/LECoincidences/setWindow 10. ns  
/gate/digitizer/LECoincidences/setInputName LESingles
```

- Ένα για Singles υψηλών ενεργειών

```
/gate/digitizer/name HECoincidences  
/gate/digitizer/insert coincidenceSorter  
/gate/digitizer/HECoincidences/setWindow 10. ns  
/gate/digitizer/HECoincidences/setInputName HESingles
```

Το σχηματικό διάγραμμα που αντιστοιχεί στο προηγούμενο παράδειγμα παρουσιάζεται στην εικόνα 5.3



Εικόνα 5.3 : Σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας του τρόπου ανάγνωσης δεδομένων εξόδου (readout) με βάση όσα αναφέρθηκαν στις παραγράφους των πολλαπλών αλυσίδων επεξεργαστών και της ταξινόμησης πολλαπλών coincidence.

5.2.6 Χειρισμός και φιλτράρισμα συμπτώσεων

5.2.6.1 Επεξεργαστές παλμών coincidence

Μόλις δημιουργηθούν τα *coincidences* θα πρέπει να εφαρμοστούν ορισμένοι χειρισμοί για να αναπαράγουν πιθανές πηγές απώλειας μετρήσεων δεδομένων που μπορούν να υπάρχουν λόγω περιορισμών στο σύστημα συλλογής δεδομένων (acquisition limitations). Για παράδειγμα, το φαινόμενο του dead time μπορεί να συνδέεται με την μονάδα *coincidence*. Η απώλεια δεδομένων μπορεί να οφείλεται επίσης και στο περιορισμένο εύρος ζώνης (limited bandwidth) των καλωδίων ή στην περιορισμένη χωρητικότητα του ενταμιευτή μνήμης στις διεπαφές εισόδου/εξόδου (I/O Interfaces). Στις επόμενες παραγράφους εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο οι πρόσφατες εκδόσεις του GATE μοντελοποιούν τέτοιου είδους επιδράσεις. Επιπλέον, στην περίπτωση των απεικονιστικών συστημάτων που χρησιμοποιούν καθυστερημένες γραμμές σύμπτωσης, τα δεδομένα που προέρχονται από τα δύο είδη *coincidences* - δηλαδή τα άμεσα (*prompt*) και τα καθυστερημένα (*delayed*) *coincidences* - μπορούν να σχηματισθούν από έναν μονοσήμαντο επεξεργαστή *coincidence* και, με αυτό τον τρόπο, κάθε είδος *coincidence* μπορεί να επηρεάσει τον ρυθμό μέτρησης του άλλου. Για παράδειγμα, ένα άμεσο *coincidence* μπορεί να προκαλέσει dead time το οποίο θα «κρύψει» ένα καθυστερημένο *coincidence* που ακολουθεί αμέσως μετά. Επίσης υπάρχει η πιθανότητα τα άμεσα *coincidences* να προκαλέσουν κορεσμό του εύρους ζώνης, έτσι ώστε τα τυχαία (*random*) events να επικαλυφθούν μερικώς.

Η μοντελοποίηση τέτοιων επιδράσεων υποδηλώνει την ανάγκη ομαδοποίησης εκ νέου των δύο διαφορετικών τύπων δεδομένων *coincidences* σε ένα μονοσήμαντο τύπο, τον οποίον θα τον διαχειρίζεται μια επίσης μονοσήμαντη μονάδα επεξεργασίας.

Ένας επεξεργαστής παλμών *coincidence* είναι μια δομή που περιέχει την λίστα των πηγών *coincidence* πάνω στις οποίες εφαρμόζεται ένα σύνολο από φίλτρα καθώς επίσης και μια λίστα με τα αντίστοιχα φίλτρα. Επισημαίνουμε πως η διάταξη της λίστας των τύπων των *coincidences* μπορεί να παίζει ρόλο στην κατανομή των δεδομένων απώλειας μεταξύ των γραμμών άμεσης και καθυστερημένης σύμπτωσης. Για παράδειγμα, εάν η γραμμή των άμεσων *coincidences* έχει προτεραιότητα ως προς την γραμμή των καθυστερημένων *coincidences*, τότε υπάρχει μεγαλύτερος κίνδυνος απόρριψης των events των καθυστερημένων *coincidences* λόγω πιθανής υπερχείλισης του ενταμιευτή. Αυτού του είδους η επίδραση μπορεί να εξαλειφθεί εάν προσδιορίσουμε μέσα σε ένα event ότι όλα τα *coincidences* που καταφθάνουν με την ίδια χρονική σημαία θα συγχωνευθούν με τυχαία σειρά.

Για την υλοποίηση ενός νέου επεξεργαστή παλμών *coincidence*, μέσω της συγχώνευσης δύο γραμμών *coincidence* σε αυτόν, καθώς επίσης και για την εφαρμογή μιας μονάδας, έστω XXX, που ακολουθείται από μια άλλη μονάδα, έστω YYY, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες εντολές (με την προϋπόθεση ότι οι δύο γραμμές άμεσων και καθυστερημένων *coincidences* (με ονομασίες prompts και delayed αντίστοιχα) έχουν ήδη οριστεί

```
/gate/digitizer/name myCoincChain
/gate/digitizer/insert coincidenceChain
/gate/digitizer/myCoincChain/addSource prompts
/gate/digitizer/myCoincChain/addSource delayed
/gate/digitizer/myCoincChain/insert XXX
# set parameter of XXX....
/gate/digitizer/myCoincChain/insert YYY
# set parameter of YYY....
```

Για να καθορίσουμε ότι οι δύο *coincidences* όταν καταφθάνουν με την ίδια χρονική σημαία θα πρέπει να μεταχειρίζονται με τυχαία σειρά, χρησιμοποιούμε την εντολή

```
/gate/digitizer/myCoincChain/usePriority false
```


5.2.6.2 Νεκρός χρόνος απόκρισης για συμβάντα σύμπτωσης (Coincidence dead time)

Ο νεκρός χρόνος απόκρισης για συμβάντα σύμπτωσης (Coincidence dead time) ορίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στην περίπτωση των *Singles*. Η μοναδική διαφορά έγκειται στο γεγονός πως στην περίπτωση του dead time των *Singles* υπάρχει η δυνατότητα προσδιορισμού του επιπέδου ιεραρχίας στο οποίο θα εφαρμοζόταν η επίδραση του dead time (και αντιστοιχεί στον διαχωρισμό των ανιχνευτών από τις ηλεκτρονικές μονάδες επεξεργασίας) ενώ στην περίπτωση του dead time των *Coincidences* η δυνατότητα προσομοίωσης ξεχωριστών μονάδων *coincidences* δεν έχει ακόμα υλοποιηθεί στο GATE. Εκτός από αυτόν τον περιορισμό, οι γραμμές εντολών ταυτίζονται και για τις δύο περιπτώσεις και περιγράφονται στην παράγραφο 3.10.2 του 3^{ου} κεφαλαίου. Επιπλέον στην περίπτωση που περισσότερα από ένα *coincidence* αντιστοιχηθούν σε ένα μοναδικό Geant4 event (δηλ. εάν περισσότερες από μια γραμμές σύμπτωσης προστεθούν στον επεξεργαστή *coincidence* παλμών, ή εάν πολλαπλά *coincidence* μεταχειρισθούν ως υπο-ζεύγη *coincidence*) τότε ο χρήστης μπορεί να καθορίσει εάν ολόκληρο το event θα γίνει δεκτό ή θα απορριφθεί, ανάλογα με τον χρόνο άφιξης του πρώτου *coincidence* event. Η δυνατότητα αυτή προσφέρεται με την εντολή

```
/gate/digitizer/myCoincChain/deadtime/conservedAllEvent true
```

5.2.6.3 Ενταμιευτές συμβάντων σύμπτωσης (Coincidence buffers)

Και στην περίπτωση αυτή η μονάδα ενταμιευτή (buffer module) που έχει σχεδιαστεί για συμβάντα σύμπτωσης χρησιμοποιεί τις ίδιες εντολές και διαθέτει τα ίδια λειτουργικά χαρακτηριστικά με την αντίστοιχη μονάδα που δημιουργήθηκε για τις λίστες *Singles* παλμών και η οποία περιγράφεται επίσης στην παράγραφο 3.10.2 του 3^{ου} κεφαλαίου.

5.2.6.4 Καταστολή πολλαπλών συμβάντων σύμπτωσης (Multiple coincidence suppression)

Εάν οι πολλαπλές συμπτώσεις (*multicoincidences*) διατηρούνται και δεν χωρίζονται σε υπό-ζεύγη (δηλ. εάν οποιαδήποτε από τις πολιτικές διαχείρισης συμπτώσεων *keepXXX* χρησιμοποιείται) τότε οι *multicoincidences* μπορούν να συνεισφέρουν στην κατάληψη τμήματος της χωρητικότητας της ροής δεδομένων, αλλά δεν μπορούν να εγγραφούν στον δίσκο. Κάθε *multicoincidence* αφαιρείται από τα δεδομένα λίγο πριν την εγγραφή στον δίσκο, εκτός εάν υπάρχει ρύθμιση διαφορετική. Εάν λοιπόν απαιτείται η απαγόρευση εγγραφής των *multicoincidences* υπάρχει η δυνατότητα να επιτευχθεί η καταστολή τους σε οποιαδήποτε προηγούμενο στάδιο χειρισμού των *coincidences* με την εισαγωγή της μονάδας *multipleKiller* στο επιθυμητό επίπεδο. Η συγκεκριμένη μονάδα δεν διαθέτει παραμέτρους και απλώς εξαλείφει τα *multicoincidence* events.

Για την εισαγωγή μιας μονάδας *multipleKiller* χρησιμοποιούμε την εντολή

```
/gate/digitizer/myCoincChain/insert multipleKiller
```

5.3 Εφαρμογή των νέων δυνατοτήτων του GATE

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μια σύντομη περιγραφή του απεικονιστικού συστήματος ECAT EXACT HR+ της Siemens το οποίο μοντελοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής με την χρήση του πακέτου λογισμικού προσομοίωσης GATE. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε βήμα προς βήμα υλοποίηση του συγκεκριμένου κώδικα της προσομοίωσης με βάση τα βασικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες του GATE που αναλύθηκαν εκτενώς στο τρίτο κεφάλαιο. Ακολούθησε παρουσίαση και ανάλυση όλων των τύπων των δεδομένων εξόδου που υποστήριζε αυτή η προσομοίωση. Επομένως για την υλοποίηση του κώδικα των μακροεντολών λήφθηκε υπόψη μόνο όσες παράμετροι είχαν οριστεί στις αρχικές εκδόσεις του GATE και περιγράφησαν στο τρίτο κεφάλαιο. Δεν συμπεριλήφθηκαν οι νέες δυνατότητες που προσφέρουν οι πρόσφατες εκδόσεις του πακέτου προσομοίωσης και οι οποίες παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Ωστόσο η προσομοίωση του συστήματος HR+ που υλοποιήθηκε στο τρίτο κεφάλαιο αποτελεί μια πλήρη, ολοκληρωμένη και σαφώς ορισμένη προσομοίωση της οποίας όλα τα αποτελέσματα συμφωνούν σε ικανοποιητικό βαθμό με τα αποτελέσματα ενός πραγματικού συστήματος.

Όπως αναφέραμε και στην αρχή αυτού του κεφαλαίου κάθε εφαρμογή και πιο συγκεκριμένα εφαρμογή προσομοίωσης στα πλαίσια αυτής της εργασίας, συνδέεται και με ένα συγκεκριμένο σύνολο προδιαγραφών υψηλού και χαμηλού επιπέδου. Ουσιαστικά εάν διαχειριστούμε μια εφαρμογή από την σκοπιά της έννοιας του συστήματος, τότε αυτό το σύνολο προδιαγραφών είναι που προσδιορίζει μια εφαρμογή και την διαφοροποιεί από τις υπόλοιπες. Απώτερος στόχος κατά τον σχεδιασμό της προσομοίωσης είναι η ικανοποίηση της προδιαγραφής που θέτει η σχετική εφαρμογή στην προσομοίωση. Με τον όρο προδιαγραφή εννοούμε την μαθηματική συνθήκη που πρέπει να ικανοποιούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τα αποτελέσματα του πραγματικού συστήματος όταν δέχονται την ίδια διέγερση κάτω από τις ίδιες πειραματικές συνθήκες έτσι ώστε να θεωρηθεί ότι υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων αυτών. Η αυστηρότητα της μαθηματικής συνθήκης καθορίζει εάν μια προδιαγραφή θα είναι υψηλού ή χαμηλού επιπέδου.

Στο τρίτο κεφάλαιο επιλέξαμε να πραγματοποιήσουμε παρουσίαση και ανάλυση του περιεχομένου ορισμένων μεταβλητών εξόδου όπως των μεταβλητών του ενεργειακού φάσματος, του τρισδιάστατου χάρτη κατανομής συμβάντων κτλ. Όσο περισσότερες μεταβλητές συμμετέχουν στην ανάλυση των αποτελεσμάτων μιας προσομοίωσης και στην συνέχεια συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μεταβλητές εξόδου του πραγματικού συστήματος τόσο αυστηρότερη (δηλ. υψηλότερου επιπέδου) θεωρείται η αντίστοιχη προδιαγραφή. Επομένως στο τρίτο κεφάλαιο επιλέχθηκε μια προδιαγραφή μετρίου επιπέδου καθώς ήταν επαρκείς για τα πλαίσια της ανάλυσης αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας. Ωστόσο αυτό δεν σημαίνει πως σε μια διαφορετική εφαρμογή προσομοίωσης υψηλότερων προδιαγραφών τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος HR+ του τρίτου κεφαλαίου θα κρίνονταν ικανοποιητικά. Συνεπώς ανάλογα με την εφαρμογή στα πλαίσια της οποίας εκτελούμε μια προσομοίωση πρέπει να καθορίσουμε το είδος και το πλήθος των παραμέτρων που θα ορίσουμε στο GATE. Όσες περισσότερες παράμετροι οριστούν, ακολουθώντας πάντα τους κανόνες ορισμών του πακέτου, τόσα περισσότερα φαινόμενα θα ληφθούν υπόψη κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, οι επιδράσεις των οποίων διαμορφώνουν σε μικρό ή μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα.

Στην συνέχεια θα αναφερθούμε συνοπτικά σε ένα απλό παράδειγμα εφαρμογής προσομοίωσης της HR+, όπου το σύνολο των παραμέτρων του *digitizer* που ορίζεται στον κώδικα του τρίτου κεφαλαίου δεν επαρκεί για την ικανοποίηση όλων των προδιαγραφών της εφαρμογής.

Συγκεκριμένα έστω ότι επιθυμούμε την μοντελοποίηση του συστήματος ECAT EXACT HR+ της Siemens με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η διαφορετική αποδοτικότητα (*efficiency*) κάθε κρυστάλλου ανιχνευτή. Η προδιαγραφή αυτή, που καθορίζει και την εφαρμογή μας, δεν μπορεί να ικανοποιηθεί με το σύνολο των παραμέτρων που ορίσαμε στο κεφάλαιο 3 και αφορούν τις βασικές παραμέτρους των αρχικών εκδόσεων του GATE, καθώς

δεν έχει υλοποιηθεί ο ορισμός παραμέτρου που θα καθορίζει τοπικά τον βαθμό απόδοσης κάθε κρυστάλλου. Υπάρχει μόνο η δυνατότητα καθορισμού ενός ενιαίου βαθμού απόδοσης για όλους τους κρυστάλλους ανιχνευτές. Όμως στις νέες εκδόσεις του GATE, όπως περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο, περιλαμβάνεται ο ορισμός της παραμέτρου του τοπικού βαθμού απόδοσης *localEfficiency* του *digitizer* του GATE, ο οποίος μας επιτρέπει τον καθορισμό ξεχωριστού βαθμού απόδοσης ανά κρύσταλλο ή ανά block ανάλογα με το επίπεδο ιεραρχίας του συστήματος *ecat* που θα επιλέξουμε να εφαρμοστεί η λειτουργία της συγκεκριμένης παραμέτρου. Το σύνολο των μακροεντολών που απαιτούνται για τον πλήρη ορισμό του τοπικού βαθμού απόδοσης παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Εάν λοιπόν επιθυμούμε να καθορίσουμε διαφορετικό βαθμό απόδοσης για κάθε κρύσταλλο του συστήματος θα πρέπει να ορίσουμε με την βοήθεια αυτών των εντολών το επίπεδο εφαρμογής της λειτουργίας της παραμέτρου *localEfficiency*.

Ολοκληρώνουμε την παράγραφο αυτή με το συμπέρασμα πως τα νέα εργαλεία προσομοίωσης που διαθέτουν οι πιο πρόσφατες εκδόσεις του GATE μπορούν να υποστηρίξουν πλέον εφαρμογές υψηλότερων προδιαγραφών δίνοντας με αυτόν τον τρόπο την δυνατότητα στον χρήστη όχι μόνο να βελτιώσει την ακρίβεια των ήδη υλοποιημένων προσομοιώσεων ορισμένων συστημάτων απεικόνισης, όπως της ECAT EXACT HR+, αλλά επίσης και να επιτύχει ικανοποιητική προσομοίωση νέων συστημάτων που διαθέτουν πιο εξελιγμένη τεχνολογία λήψης και επεξεργασίας δεδομένων και πιο πολύπλοκη κατανομή κρυσταλλικών ανιχνευτών. Η δυνατότητα αυτή θα συμβάλλει στην βελτιστοποίηση των πρωτοκόλλων λήψης δεδομένων και στην χρήση αποτελεσματικότερων κατανομών κρυστάλλων, αφού όπως διαπιστώθηκε στην παρούσα εργασία η εξέλιξη των συστημάτων τομογραφικής απεικόνισης συμβαδίζει με την εξέλιξη των πακέτων λογισμικού προσομοίωσης.

Παράρτημα Α

Στο παράρτημα αυτό παραθέτουμε τον κώδικα που υλοποιήθηκε στο τέταρτο κεφάλαιο για την προσομοίωση της HR+ για την περίπτωση του πρώτου και του τρίτου πειράματος, δηλαδή για την περίπτωση σημειακής και γραμμικής πηγής στον αέρα. Τα αντίστοιχα πειράματα για την περίπτωση που η πηγή είναι τοποθετημένοι στο κέντρο ενός phantom που περιέχει νερό, απλά αντικαθιστούμε την εντολή που ορίζει το υλικό του αντικειμένου phantom, όπως εξηγήσαμε στο τέταρτο κεφάλαιο.

Επομένως ο κώδικας μακροεντολών για την περίπτωση του 1^{ου} πειράματος είναι ο ακόλουθος:

```
#
#   V I S U A L I S A T I O N
#
/vis/open OGLSX
/vis/viewer/reset
/vis/drawView 45 45
/vis/viewer/zoom 4
/vis/viewer/set/style surface
/vis/drawVolume
/tracking/storeTrajectory 1
/vis/scene/endOfEventAction accumulate
/vis/viewer/update
/gate/geometry/enableAutoUpdate

#
#   W O R L D
#
/gate/world/geometry/setXLength 400. cm
/gate/world/geometry/setYLength 400. cm
/gate/world/geometry/setZLength 400. cm

#   D E F I N I T I O N   A N D   D E S C R I T I O N   O F
#   S I E M E N S   E C A T   E X A C T   H R +   P E T   S C A N N E R

#   E C A T
/gate/world/daughters/name ecat
/gate/world/daughters/insert cylinder
/gate/ecat/setMaterial Air
/gate/ecat/geometry/setRmax 49.2 cm
/gate/ecat/geometry/setRmin 41.2 cm
/gate/ecat/geometry/setHeight 15.7 cm
/gate/ecat/vis/forceWireframe

#   E N D - S H I E L D I N G
/gate/ecat/daughters/name endshielding
/gate/ecat/daughters/insert box
/gate/endshielding/placement/setTranslation 445. 0.0 0.0 mm
/gate/endshielding/geometry/setXLength 80. mm
/gate/endshielding/geometry/setYLength 35.942 mm
/gate/endshielding/geometry/setZLength 1.0 mm
```

```

/gate/endshielding/setMaterial Lead
/gate/endshielding/vis/setColor white
/gate/endshielding/repeaters/insert cubicArray
/gate/endshielding/cubicArray/setRepeatNumberX 1
/gate/endshielding/cubicArray/setRepeatNumberY 1
/gate/endshielding/cubicArray/setRepeatNumberZ 2
/gate/endshielding/cubicArray/setRepeatVector 0.0 0.0 15.6 cm
/gate/endshielding/repeaters/insert ring
/gate/endshielding/ring/setRepeatNumber 72

```

```

#      B L O C K
/gate/ecat/daughters/name block
/gate/ecat/daughters/insert box
/gate/block/placement/setTranslation 445.0 0.0 0.0 mm
/gate/block/geometry/setXLength 80. mm
/gate/block/geometry/setYLength 35.942 mm
/gate/block/geometry/setZLength 38.29625 mm
/gate/block/setMaterial Air
/gate/block/vis/forceWireframe

```

```

#      C R Y S T A L
/gate/block/daughters/name crystal
/gate/block/daughters/insert box
/gate/crystal/geometry/setXLength 30.0 mm
/gate/crystal/geometry/setYLength 4.05 mm
/gate/crystal/geometry/setZLength 4.39 mm
/gate/crystal/placement/setTranslation -25. 0. 0. mm
/gate/crystal/setMaterial BGO
/gate/crystal/vis/setColor blue

```

```

#      P H O T O M U L T I P L I E R   T U B E
/gate/block/daughters/name PMT
/gate/block/daughters/insert cylinder
/gate/PMT/geometry/setRmin 0. mm
/gate/PMT/geometry/setRmax 8.758625 mm
/gate/PMT/geometry/setHeight 50.0 mm
/gate/PMT/placement/setTranslation 15.0 0.0 0.0 mm
/gate/PMT/placement/alignToX
/gate/PMT/setMaterial Glass
/gate/PMT/vis/setColor red

```

```

#      R E P E A T   C R Y S T A L
/gate/crystal/repeaters/insert cubicArray
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatNumberX 1
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatNumberY 8
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatNumberZ 8
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatVector 0. 4.4928 4.84375 mm

```

```

#      R E P E A T   P M T   T U B E
/gate/PMT/repeaters/insert cubicArray
/gate/PMT/cubicArray/setRepeatNumberX 1
/gate/PMT/cubicArray/setRepeatNumberY 2
/gate/PMT/cubicArray/setRepeatNumberZ 2
/gate/PMT/cubicArray/setRepeatVector 0. 17.971 19.148125 mm

```

```

#      R E P E A T   B L O C K
/gate/block/repeaters/insert linear

```

```

/gate/block/linear/setRepeatNumber 4
/gate/block/linear/setRepeatVector 0. 0. 38.75 mm
/gate/block/repeaters/insert ring
/gate/block/ring/setRepeatNumber 72

#           P A T I E N T   B E D
/gate/world/daughters/name bed
/gate/world/daughters/insert box
/gate/bed/placement/setTranslation 0.0 -11.15 0.0 cm
/gate/bed/geometry/setXLength 41. cm
/gate/bed/geometry/setYLength 2. cm
/gate/bed/geometry/setZLength 284. cm
/gate/bed/setMaterial Plastic
/gate/bed/vis/setColor grey

#       A T T A C H   S Y S T E M
/gate/systems/ecat/block/attach block
/gate/systems/ecat/crystal/attach crystal

#-----00000000000000000000000000000000-----#
#                                                                 #
#       D E F I N I T I O N   A N D   D E S C R I T I O N       #
#               O F   Y O U R   P H A N T O M                   #
#                                                                 #
#-----00000000000000000000000000000000-----#

/gate/world/daughters/name phantomVol
/gate/world/daughters/insert cylinder
/gate/phantomVol/setMaterial Plastic
/gate/phantomVol/vis/forceWireframe
/gate/phantomVol/vis/setColor green
/gate/phantomVol/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/phantomVol/geometry/setRmax 10.15 cm
/gate/phantomVol/geometry/setHeight 80. cm

/gate/phantomVol/daughters/name phantom
/gate/phantomVol/daughters/insert cylinder
/gate/phantom/setMaterial Air
#/gate/phantom/setMaterial Water
/gate/phantom/vis/forceWireframe
/gate/phantom/vis/setColor blue
/gate/phantom/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/phantom/geometry/setRmax 10.0 cm
/gate/phantom/geometry/setHeight 77. cm

#       D E F I N E   S O U R C E   V O L U M E
/gate/phantom/daughters/name srcVol
/gate/phantom/daughters/insert cylinder
/gate/srcVol/setMaterial Glass
/gate/srcVol/vis/forceWireframe
/gate/srcVol/vis/setColor white
/gate/srcVol/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/srcVol/geometry/setRmax 0.6 mm
/gate/srcVol/geometry/setHeight 1.2 mm

#       D E F I N E   S O U R C E   S O L U T I O N
/gate/srcVol/daughters/name srcF18
/gate/srcVol/daughters/insert cylinder
/gate/srcF18/setMaterial Water
#/gate/srcF18/vis/forceWireframe
/gate/srcF18/vis/setColor blue

```

```

/gate/srcF18/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/srcF18/geometry/setRmax 0.5 mm
/gate/srcF18/geometry/setHeight 1. mm

```

```

#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#           A T T A C H       P H A N T O M       S D       &
#           A T T A C H       C R Y S T A L       S D
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#

```

```

/gate/phantomVol/attachPhantomSD
#/gate/phantom/attachPhantomSD
/gate/bed/attachPhantomSD
/gate/PMT/attachPhantomSD
/gate/endshielding/attachPhantomSD
/gate/crystal/attachCrystalSD

```

```

#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#           S E C O N D   P A R T   O F   Y O U R
#           P E T   S I M U L A T I O N
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#

```

```

#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#   D E F I N I T I O N   A N D   D E S C R I T I O N
#   O F   Y O U R   P H Y S I C S
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#

```

```

#   E M   P R O C E S S
/gate/physics/gamma/selectRayleigh lowenergy
/gate/physics/gamma/selectPhotoelectric standard
/gate/physics/gamma/selectCompton standard

#   I N A C T I V E   S E C O N D A R Y   E L E C T R O N S
/gate/physics/setElectronCut 1. m

#   I N A C T I V E   X - R A Y S
/gate/physics/setXRayCut 1. GeV
/gate/physics/setDeltaRayCut 1. GeV

```

```

#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#   I N I T I A L I Z A T I O N   O F   Y O U R
#   S I M U L A T I O N
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#

```

```

/gate/geometry/enableAutoUpdate
/run/initialize

```

```

#-----oooooooooooooooooooooooo-----#
#
#   D E F I N I T I O N   O F   Y O U R   A C Q U I S I T I O N
#   D I G I T I Z E R   &   C O I N C I D E N C E   S H O R T E R
#
#-----oooooooooooooooooooooooo-----#

#       A D D E R
/gate/digitizer/Singles/insert adder

#       R E A D O U T
/gate/digitizer/Singles/insert readout
/gate/digitizer/Singles/readout/setDepth 1

#       E N E R G Y   B L U R R I N G
/gate/digitizer/Singles/insert blurring
/gate/digitizer/Singles/blurring/setResolution 0.26
/gate/digitizer/Singles/blurring/setEnergyOfReference 511. keV

#       E N E R G Y   C U T
/gate/digitizer/Singles/insert thresholder
/gate/digitizer/Singles/thresholder/setThreshold 0. keV
/gate/digitizer/Singles/insert upholder
/gate/digitizer/Singles/upholder/setUphold 750. keV

#       D E A D   T I M E
/gate/digitizer/Singles/insert deadtime
/gate/digitizer/Singles/deadtime/setDeadTime 3000000. ps
/gate/digitizer/Singles/deadtime/setMode paralysable
/gate/digitizer/Singles/deadtime/chooseDTVolume block

#       C O I N C I   S O R T E R
/gate/digitizer/Coincidences/setWindow 10. ns

#-----oooooooooooooooooooooooo-----#
#
#           D E F I N I T I O N   O F
#           Y O U R   O U T P U T   F I L E
#
#-----oooooooooooooooooooooooo-----#

#       C H A N G E   T H E   S E E D (1)   O R   N O T (0)
/gate/output/root/setSaveRndmFlag 1

#       S E T U P   -   R O O T _ F I L E
/gate/output/root/setFileName HR+_1_3newlongACT
/gate/output/root/setRootSinglesAdderFlag 0
/gate/output/root/setRootSinglesReadoutFlag 0
/gate/output/root/setRootHitFlag 0

```



```

/gate/output/root/setRootSinglesFlag 0
/gate/output/root/setRootNtupleFlag 0
/gate/output/root/setRootCoincidencesFlag 1

#      S E T U P   -   A S C I I   _   F I L E
/gate/output/ascii/setOutFileSinglesAdderFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileSinglesReadoutFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileSinglesThresholdFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileSinglesUpholderFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileSinglesFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileHitsFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileCoincidencesFlag 0

#      E C A T 7
/gate/output/sinogram/enable
/gate/output/sinogram/setTangCrystalBlurring 1.8 mm
/gate/output/sinogram/setAxialCrystalBlurring 1.8 mm

/gate/output/ecat7/enable
/gate/output/ecat7/verbose 2
/gate/output/ecat7/setFileName HR+_Ecat_1_3newlongACT
/gate/output/ecat7/describe
/gate/output/ecat7/mashing 1
/gate/output/ecat7/span 3
/gate/output/ecat7/maxringdiff 22

#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#      D E F I N I T I O N   O F
#      Y O U R   V E R B O S I T Y   L E V E L
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#

/control/verbose 0
/grdm/verbose 0
/run/verbose 0
/event/verbose 0
/tracking/verbose 0
/gate/application/verbose 0
/gate/generator/verbose 0
/gate/stacking/verbose 0
/gate/event/verbose 0
/gate/source/verbose 0

#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#      D E F I N I T I O N   O F
#      Y O U R   S O U R C E S
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#

# F A S T   P R O D U C T I O N   M O D U L E   F O R   F - 1 8   I S
O T O P E S
/gate/source/addSource F18CylinderSource
/gate/source/F18CylinderSource/setActivity 10000000. becquerel
/gate/source/F18CylinderSource/gps/particle e+
/gate/source/F18CylinderSource/setForcedUnstableFlag true
/gate/source/F18CylinderSource/setForcedHalfLife 6586 s

```

```

/gate/source/F18CylinderSource/gps/energytype Fluor18
/gate/source/F18CylinderSource/gps/type Volume
/gate/source/F18CylinderSource/gps/shape Cylinder
/gate/source/F18CylinderSource/gps/radius 0.5 mm
/gate/source/F18CylinderSource/gps/halfz 0.5 mm
/gate/source/F18CylinderSource/gps/angtype iso
/gate/source/F18CylinderSource/gps/centre 0.0 0.0 0. cm

```

```

/gate/source/list

```

```

#-----oooooooooooooooooooooooo-----#
#
#           S T A R T   A C Q U I S I T I O N           #
#           T I M E   P A R A M E T E R S               #
#
#-----oooooooooooooooooooooooo-----#

#
# EXPERIMENT
#
/gate/application/setTimeSlice      4.  s
/gate/application/setTimeStart     0.  s
/gate/application/setTimeStop      4.  s

#
# LET'S RUN THE SIMULATION!
#
/gate/application/startDAQ

```

Αντίστοιχα ο κώδικας μακροεντολών για την περίπτωση του 3^{ου} πειράματος παρουσιάζεται παρακάτω:

```
#
#   V I S U A L I S A T I O N
#
/vis/open OGLSX
/vis/viewer/reset
/vis/drawView 45 45
/vis/viewer/zoom 4
/vis/viewer/set/style surface
/vis/drawVolume
/tracking/storeTrajectory 1
/vis/scene/endOfEventAction accumulate
/vis/viewer/update
/gate/geometry/enableAutoUpdate

#
#   W O R L D
#
/gate/world/geometry/setXLength 400. cm
/gate/world/geometry/setYLength 400. cm
/gate/world/geometry/setZLength 400. cm


#   D E F I N I T I O N   A N D   D E S C R I T I O N   O F
#   S I E M E N S   E C A T   E X A C T   H R +   P E T   S C A N N E R


#   E C A T
/gate/world/daughters/name ecatt
/gate/world/daughters/insert cylinder
/gate/ecatt/setMaterial Air
/gate/ecatt/geometry/setRmax 49.2 cm
/gate/ecatt/geometry/setRmin 41.2 cm
/gate/ecatt/geometry/setHeight 15.7 cm
/gate/ecatt/vis/forceWireframe

#   E N D - S H I E L D I N G
/gate/ecatt/daughters/name endshielding
/gate/ecatt/daughters/insert box
/gate/endshielding/placement/setTranslation 445. 0.0 0.0 mm
/gate/endshielding/geometry/setXLength 80. mm
/gate/endshielding/geometry/setYLength 35.942 mm
/gate/endshielding/geometry/setZLength 1.0 mm
/gate/endshielding/setMaterial Lead
/gate/endshielding/vis/setColor white
/gate/endshielding/repeaters/insert cubicArray
/gate/endshielding/cubicArray/setRepeatNumberX 1
/gate/endshielding/cubicArray/setRepeatNumberY 1
/gate/endshielding/cubicArray/setRepeatNumberZ 2
/gate/endshielding/cubicArray/setRepeatVector 0.0 0.0 15.6 cm
/gate/endshielding/repeaters/insert ring
/gate/endshielding/ring/setRepeatNumber 72


#   B L O C K
/gate/ecatt/daughters/name block
/gate/ecatt/daughters/insert box
```

```

/gate/block/placement/setTranslation 445.0 0.0 0.0 mm
/gate/block/geometry/setXLength 80. mm
/gate/block/geometry/setYLength 35.942 mm
/gate/block/geometry/setZLength 38.29625 mm
/gate/block/setMaterial Air
/gate/block/vis/forceWireframe

#      C R Y S T A L
/gate/block/daughters/name crystal
/gate/block/daughters/insert box
/gate/crystal/geometry/setXLength 30.0 mm
/gate/crystal/geometry/setYLength 4.05 mm
/gate/crystal/geometry/setZLength 4.39 mm
/gate/crystal/placement/setTranslation -25. 0. 0. mm
/gate/crystal/setMaterial BGO
/gate/crystal/vis/setColor blue

#      P H O T O M U L T I P L I E R      T U B E
/gate/block/daughters/name PMT
/gate/block/daughters/insert cylinder
/gate/PMT/geometry/setRmin 0. mm
/gate/PMT/geometry/setRmax 8.758625 mm
/gate/PMT/geometry/setHeight 50.0 mm
/gate/PMT/placement/setTranslation 15.0 0.0 0.0 mm
/gate/PMT/placement/alignToX
/gate/PMT/setMaterial Glass
/gate/PMT/vis/setColor red

#      R E P E A T      C R Y S T A L
/gate/crystal/repeaters/insert cubicArray
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatNumberX 1
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatNumberY 8
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatNumberZ 8
/gate/crystal/cubicArray/setRepeatVector 0. 4.4928 4.84375 mm

#      R E P E A T      P M T      T U B E
/gate/PMT/repeaters/insert cubicArray
/gate/PMT/cubicArray/setRepeatNumberX 1
/gate/PMT/cubicArray/setRepeatNumberY 2
/gate/PMT/cubicArray/setRepeatNumberZ 2
/gate/PMT/cubicArray/setRepeatVector 0. 17.971 19.148125 mm

#      R E P E A T      B L O C K
/gate/block/repeaters/insert linear
/gate/block/linear/setRepeatNumber 4
/gate/block/linear/setRepeatVector 0. 0. 38.75 mm
/gate/block/repeaters/insert ring
/gate/block/ring/setRepeatNumber 72

#      P A T I E N T      B E D
/gate/world/daughters/name bed
/gate/world/daughters/insert box
/gate/bed/placement/setTranslation 0.0 -11.15 0.0 cm
/gate/bed/geometry/setXLength 41. cm
/gate/bed/geometry/setYLength 2. cm
/gate/bed/geometry/setZLength 284. cm
/gate/bed/setMaterial Plastic
/gate/bed/vis/setColor grey

```

```

#           I N S I D E   B E D
#/gate/bed/daughters/name inbed
#/gate/bed/daughters/insert box
#/gate/inbed/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
#/gate/inbed/geometry/setXLength 40 cm
#/gate/inbed/geometry/setYLength 1 cm
#/gate/inbed/geometry/setZLength 283 cm
#/gate/inbed/setMaterial Air
#/gate/inbed/vis/setColor black

#       A T T A C H   S Y S T E M
/gate/systems/ecat/block/attach block
/gate/systems/ecat/crystal/attach crystal

#-----00000000000000000000000000000000-----#
#                                                                                                     #
#       D E F I N I T I O N   A N D   D E S C R I T I O N                                           #
#               O F   Y O U R   P H A N T O M                                                         #
#                                                                                                     #
#-----00000000000000000000000000000000-----#

/gate/world/daughters/name phantomVol
/gate/world/daughters/insert cylinder
/gate/phantomVol/setMaterial Plastic
/gate/phantomVol/vis/forceWireframe
/gate/phantomVol/vis/setColor green
/gate/phantomVol/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/phantomVol/geometry/setRmax 10.15 cm
/gate/phantomVol/geometry/setHeight 80. cm

/gate/phantomVol/daughters/name phantom
/gate/phantomVol/daughters/insert cylinder
/gate/phantom/setMaterial Air
#/gate/phantom/setMaterial Water
/gate/phantom/vis/forceWireframe
/gate/phantom/vis/setColor blue
/gate/phantom/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/phantom/geometry/setRmax 10.0 cm
/gate/phantom/geometry/setHeight 77. cm

#       D E F I N E   S O U R C E   V O L U M E
/gate/phantom/daughters/name srcVol
/gate/phantom/daughters/insert cylinder
/gate/srcVol/setMaterial Glass
/gate/srcVol/vis/forceWireframe
/gate/srcVol/vis/setColor white
/gate/srcVol/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/srcVol/geometry/setRmax 3. mm
/gate/srcVol/geometry/setHeight 76.1 cm

#       D E F I N E   S O U R C E   S O L U T I O N
/gate/srcVol/daughters/name srcF18
/gate/srcVol/daughters/insert cylinder
/gate/srcF18/setMaterial Water
#/gate/srcF18/vis/forceWireframe
/gate/srcF18/vis/setColor blue
/gate/srcF18/placement/setTranslation 0.0 0.0 0.0 cm
/gate/srcF18/geometry/setRmax 2.5 mm
/gate/srcF18/geometry/setHeight 76. cm

```

```
#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#           A T T A C H       P H A N T O M       S D       &
#           A T T A C H       C R Y S T A L       S D
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#
```

```
/gate/phantomVol/attachPhantomSD
/gate/phantom/attachPhantomSD
/gate/bed/attachPhantomSD
/gate/PMT/attachPhantomSD
/gate/endshielding/attachPhantomSD
/gate/crystal/attachCrystalSD
```

```
#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#           S E C O N D   P A R T   O F   Y O U R
#           P E T   S I M U L A T I O N
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#
```

```
#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#   D E F I N I T I O N   A N D   D E S C R I T I O N
#   O F   Y O U R   P H Y S I C S
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#
```

```
#   E M   P R O C E S S
/gate/physics/gamma/selectRayleigh lowenergy
/gate/physics/gamma/selectPhotoelectric standard
/gate/physics/gamma/selectCompton standard

#   I N A C T I V E   S E C O N D A R Y   E L E C T R O N S
/gate/physics/setElectronCut 1. m

#   I N A C T I V E   X - R A Y S
/gate/physics/setXRayCut 1. GeV
/gate/physics/setDeltaRayCut 1. GeV
```

```
#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#   I N I T I A L I Z A T I O N   O F   Y O U R
#   S I M U L A T I O N
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#
```

```
/gate/geometry/enableAutoUpdate
/run/initialize
```

```

#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#   D E F I N I T I O N   O F   Y O U R   A C Q U I S I T I O N   #
#   D I G I T I Z E R   &   C O I N C I D E N C E   S H O R T E R   #
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#

#       A D D E R
/gate/digitizer/Singles/insert adder

#       R E A D O U T
/gate/digitizer/Singles/insert readout
/gate/digitizer/Singles/readout/setDepth 1

#       E N E R G Y   B L U R R I N G
/gate/digitizer/Singles/insert blurring
/gate/digitizer/Singles/blurring/setResolution 0.26
/gate/digitizer/Singles/blurring/setEnergyOfReference 511. keV

#       E N E R G Y   C U T
/gate/digitizer/Singles/insert thresholder
/gate/digitizer/Singles/thresholder/setThreshold 0. keV
/gate/digitizer/Singles/insert upholder
/gate/digitizer/Singles/upholder/setUphold 750. keV

#       D E A D   T I M E
/gate/digitizer/Singles/insert deadtime
/gate/digitizer/Singles/deadtime/setDeadTime 3000000. ps
/gate/digitizer/Singles/deadtime/setMode paralysable
/gate/digitizer/Singles/deadtime/chooseDTVVolume block

#       C O I N C I   S O R T E R
/gate/digitizer/Coincidences/setWindow 10. ns

#-----00000000000000000000000000000000-----#
#
#               D E F I N I T I O N   O F
#               Y O U R   O U T P U T   F I L E
#
#-----00000000000000000000000000000000-----#

#       C H A N G E   T H E   S E E D (1) O R   N O T (0)
/gate/output/root/setSaveRndmFlag 1

#       S E T U P   -   R O O T _ F I L E
/gate/output/root/setFileName HR+_3_3newlongACT
/gate/output/root/setRootSinglesAdderFlag 0
/gate/output/root/setRootSinglesReadoutFlag 0
/gate/output/root/setRootHitFlag 0
/gate/output/root/setRootSinglesFlag 0
/gate/output/root/setRootNtupleFlag 0
/gate/output/root/setRootCoincidencesFlag 1

```

```

#      S E T U P   -   A S C I I   _   F I L E
/gate/output/ascii/setOutFileSinglesAdderFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileSinglesReadoutFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileSinglesThresholdFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileSinglesUpholderFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileSinglesFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileHitsFlag 0
/gate/output/ascii/setOutFileCoincidencesFlag 0

#      E C A T 7
/gate/output/sinogram/enable
/gate/output/sinogram/setTangCrystalBlurring 1.8 mm
/gate/output/sinogram/setAxialCrystalBlurring 1.8 mm

/gate/output/ecat7/enable
/gate/output/ecat7/verbose 1
/gate/output/ecat7/setFileName HR+_Ecat_3_31newlongACT
/gate/output/ecat7/describe
/gate/output/ecat7/mashing 1
/gate/output/ecat7/span 3
/gate/output/ecat7/maxringdiff 22


#-----0000000000000000000000000000000000000000-----#
#
#              D E F I N I T I O N   O F
#      Y O U R   V E R B O S I T Y   L E V E L
#
#-----0000000000000000000000000000000000000000-----#

/control/verbose 0
/grdm/verbose 0
/run/verbose 0
/event/verbose 0
/tracking/verbose 0
/gate/application/verbose 0
/gate/generator/verbose 0
/gate/stacking/verbose 0
/gate/event/verbose 0
/gate/source/verbose 0


#-----0000000000000000000000000000000000000000-----#
#
#              D E F I N I T I O N   O F
#      Y O U R   S O U R C E S
#
#-----0000000000000000000000000000000000000000-----#


# F A S T   P R O D U C T I O N   M O D U L E   F O R   F - 1 8   I S
O T O P E S
/gate/source/addSource F18CylinderSource
/gate/source/F18CylinderSource/setActivity 10000000. becquerel
/gate/source/F18CylinderSource/gps/particle e+
/gate/source/F18CylinderSource/setForcedUnstableFlag true

```



```

/gate/source/F18CylinderSource/setForcedHalfLife 6586 s
/gate/source/F18CylinderSource/gps/energytype Fluor18
/gate/source/F18CylinderSource/gps/type Volume
/gate/source/F18CylinderSource/gps/shape Cylinder
/gate/source/F18CylinderSource/gps/radius 2.5 mm
/gate/source/F18CylinderSource/gps/halfz 38. cm
/gate/source/F18CylinderSource/gps/angtype iso
/gate/source/F18CylinderSource/gps/centre 0.0 0.0 0. cm

```

```

/gate/source/list

```

```

#-----00000000000000000000000000000000-----#
#                                                                 #
#           S T A R T   A C Q U I S I T I O N                 #
#           T I M E   P A R A M E T E R S                     #
#                                                                 #
#-----00000000000000000000000000000000-----#

#
# EXPERIMENT
#
/gate/application/setTimeSlice      4.  s
/gate/application/setTimeStart      0.  s
/gate/application/setTimeStop       4.  s

#
# LET'S RUN THE SIMULATION!
#
#/gate/application/startDAQ

```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Beaney, R. Positron emission tomography in the study of human tumors. *Sem Nucl Med*, 14:324-341, 1984.
- Bettinardi, V, Gilardi, MC, Lucignani, G, et al: A procedure for patient repositioning for misalignment between transmission and emission data in PET heart studies. *J. Nucl. Med.*, 34:137-142, 1993.
- Dahlbom, M, Hoffman, EJ, Hoh, CK, Schiepers, C, Rosenqvist, G, Hawkins, RA, Phelps, ME. Evaluation of a positron emission tomography (PET) scanner for whole body imaging. *J. Nucl. Med.* 33:1191-1199, 1992.
- Dahlbom M, Schiepers C, Hoffman EJ, Hoh C, Guerrero TM, Hawkins RA, Phelps ME: Evaluation of PET for whole body imaging. *J Nucl Med*, 31:749, 1990.
- Hoffman, E. J., Guerrero, T. M., Germano, G., Digby, W. M., & Dahlbom, M. (1989). PET system calibrations and corrections for quantitative and spatially accurate images. *IEEE Trans Nucl Sci* NS 36, 1108-1112.
- Latack, J, Abou-Khalil, B, Siegel, G, Sackellares, J, Gabrielsen, T, Aisen, A. Patients with partial seizures: Evaluation by MR, CT, and PET imaging. *Radiology* 159:159-63, 1986
- .Mazziotta, J. Huntington's disease: Studies with structural imaging techniques and positron emission tomography. *Semin Neurol*, 9:360-9, 1989.
- Meikle, SR, Dahlbom, M, Cherry, SR: Attenuation correction using count-limited transmission data in positron emission tomography. *J Nucl Med*, 34:143-144, 1993.
- Mintun, M, Raichle, M, Kilbourn, M, Wooten, G, Welch, M: A quantitative model for the in vivo assessment of drug binding sites with positron emission tomography. *Ann Neurol*, 15:217-27, 1984.
- Saha GB, MacIntyre WJ, Go RT. Cyclotrons and positron emission tomography radiopharmaceuticals for clinical imaging. *Seminars in Nuclear Medicine*, 1992, 22:150-61.
- Sorenson, JA, Phelps, ME. *Physics in Nuclear Medicine*. Grune & Stratton, New York, 1980.
- Tavernier S; Bruyndonckx P; Guerard B; Zhang S. Progress in the development of a PET scanner based on BaF₂ scintillator and photosensitive wire chambers. *Med Prog Technol*, 1991, 17:237-41.
- Townsend, D, Wensveen, M, Byars, L, Geissbuhler, A, Tochon-Danguy, H, Christin, A, Defrise, M, Bailey, D, Grootenck, S, Donath, A, Nutt, R: A rotating PET scanner using BGO block detectors: Design, performance and applications. *J Nucl Med*, 34:1367-1376, 1993.
- Michael E. Phelps, Sanjiv Sam Gambhir Donald Kirk Mahoney, Jeffrey A. Markham, Let's Play PET Tutorial, Crump Institute for Molecular Imaging, UCLA
- Buvat I and Castiglioni I 2002 Monte Carlo simulations in SPET and PET *Q. J. Nucl. Med.* **46** 48-61
- Brun R, Bruyant F, Maire M, McPherson A C, Zanarini P 1987 GEANT3 *Technical Report* CERN DD/EE/84-1
- EGS4 website: <http://www.slac.stanford.edu/egs/>
- MCNP website: <http://laws.lanl.gov/x5/MCNP/index.html>
- Agostinelli S *et al* 2003 GEANT4 - a simulation toolkit *Nucl. Instr. Meth.* **A506** 250-303
- GEANT4 website: <http://wwwasd.web.cern.ch/wwwasd/geant4/>
- Santin G, Strul D, Lazaro D, Simon L, Krieguer M, Vieira Martins M, Breton V and Morel C 2003 GATE: A GEANT4-based simulation platform for PET and SPECT integrating movement and time management *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1516-1521
- Strul D, Santin G, Lazaro D, Breton V and Morel C 2003 GATE (GEANT4 Application for Tomographic Emission): a PET/SPECT general-purpose simulation platform *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 125C 75-79

- Assi K *et al* 2004 Monte Carlo simulation in PET and SPECT instrumentation using GATE to appear in *Nucl. Instr. Meth*
- Jan S, Santin G, Strul S, Staelens S, Assi K, Autret D, Avner S, Barbier R, Bardi s M, Bloomfield P, Brasse D, Breton V, Bruyndonckx P, Buvat I, Chatziioannou A F, Choi Y, Chung Y H, Comtat C, Donnarieix D, Ferrer L, Glick S J, Groiselle C, Kerhoas-Cavata S, Kirov A S, Kohli V, Koole M, Krieguer M, van der Laan D J, Lamare F, Largeron G, Lartizien C, Lazaro D, Maas M C, Maigne L, Mayet F, Melot F, Merheb C, Morel C, Nehmeh S, Pennacchio E, Perez J, Pietrzyk U, Rannou F R, Rey M, Schaart D R, Schmidlein C R, Simon L, Song T Y, Vieira J M, Visvikis D, Van de Walle R, Wie rs E 2004 GATE - GEANT4 Application for Tomographic Emission: a simulation toolkit for PET and SPECT, to be submitted to *Phys. Med. Biol.*
- GATE website: <http://www-lphe.epfl.ch/GATE/>
- Staelens S, Strul D, Santin G, Koole M, Vandenberghe S, D'Asseler Y, Lemahieu I and Van de Walle R 2003 Monte Carlo simulations of a scintillation camera using GATE: validation and application modelling *Phys. Med. Biol.* 48 3021-3042
- Lazaro D, Buvat I, Loudos G, Strul D, Santin G, Giokaris N, Donnarieix D, Maigne L, Spanoudaki V, Styliaris S, Staelens S and Breton V 2003 Monte Carlo simulation of a CsI(Tl) gamma camera dedicated to small animal imaging using GATE submitted to *Phys. Med. Biol*
- doxygen website: <http://www.doxygen.org/index.html>
- R. Lecomte *at al.* Design and Engineering Aspects of a high resolution Positron Tomograph for small animal imaging. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* Vol 41, n04, August 1994, 1446-1452
- Casey M and Nutt R 1986 A multicrystal two dimensional BGO detector block system for positron emission tomography *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **33** 460-463
- Biggs F, and Lighthill R 1990 Preprint Sandia Laboratory, SAND 87-0070
- Knoll G F 1979 Radiation detection and measurement, *John Wiley & Sons*, New York
- Brun R, Rademakers F 1997 ROOT - An object oriented data analysis framework *Nucl. Instr. Meth.* A389 81-86
- ROOT website : <http://root.cern.ch/>
- Interfile website: <http://gamma.wustl.edu/interfile33/interfile33.complete>
- Defrise M *at al* 1997 Exact and approximate rebinning algorithms for 3-D PET data *IEEE Trans. Med. Imag.* **16** 145-158
- *Software for Tomographic Image Reconstruction (STIR)* website: <http://stir.sourceforge.net>
- BIOSIM laboratory website: www.biosim.ntua.gr/NIMgroup
- N. Karakatsanis, N.Sakellios, X. Tsantilas, N. Dikaios, C. Tsoumpas, K. Nikita, D. Lazaro, G.Loudos, A. Louizi, I. Valais, D. Nikolopoulos, J. Malamitsi, I. Kandarakis "A Comparative Evaluation of two commercial PET Scanners using GATE", (to appear in *Nuclear Instruments and Methods A*, within 2006).
- D Lazaro, I Buvat, G Loudos, D Strul, G Santin, N Giokaris, D Donnarieix, L Maigne, V Spanoudaki, S Styliaris, S Staelens and V Breton "Validation of the GATE Monte Carlo simulation platform for modelling a CsI(Tl) scintillation camera dedicated to small-animal imaging", *Phys. Med. Biol.* 49 2004, 271-285.
- S. Jan¹, C. Comtat¹, *Member, IEEE*, D. Strul², G. Santin², and R. Tribossen¹ Monte Carlo Simulation for the ECAT EXACT HR+ system using GATE
- F. Bataille, C. Comtat, *Member, IEEE*, S. Jan, and R. Tribossen Monte Carlo Simulation for the ECAT HRRT using GATE
- [Rea98] Reader A J, Visvikis A, Erlandsson K, Ott R J, and Flower M A (1998) Intercomparison of four reconstruction techniques for positron volume imaging with rotating planar detectors. *Phys. Med. Biol.*, 43: 823-34.
- [Kin89] Kinahan P E and Rogers J G (1989) Analytic 3D image reconstruction using all detected events. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 36: 964-968.