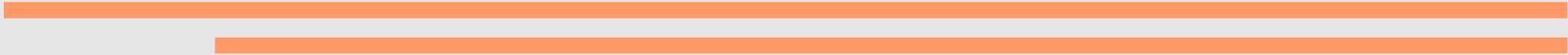


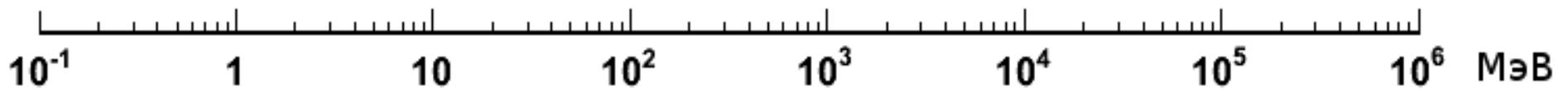
Взаимодействия адронов



ядерные реакции
деление, захват
мультифрагментация

множественное рождение адронов
внутриядерные
каскады
адронизация кварков и глюонов

рассеяние на нуклонах



Невозможно описать все взаимодействия одной моделью

Адронные процессы в Geant4

- Неупругое рассеяние (G4HadronInelasticProcess)
- Упругое рассеяние (G4HadronElasticProcess)
- Деление (G4HadronFissionProcess)
- Захват (G4HadronCaptureProcess)

Вероятность взаимодействия, и вероятность образования конкретного конечного состояния рассчитываются независимо

Полные сечения взаимодействий

Для каждого процесса должен быть определен объект `G4CrossSectionDataStore`, содержащий таблицы сечений

Полные нуклон-ядерные и пион-ядерные сечения

- Стандартная параметризация

E. Levin, hep-ph/9710546, U. Dersch, et al, hep-ex/9910052

M.J. Longo, et al, Phys.Rev.Lett. 33 (1974) 725

- Параметризация Барашенкова-Грибова-Глаубера

Полные ядро-ядерные сечения

- Параметризации Кох и Shen (<10 ГэВ/нуклон), Sihver (>100 МэВ/нуклон), Tripathi (< 1 ГэВ/нуклон)
- Параметризация Грибова-Глаубера для ядер (*B.Kopeliovich, nucl-th/0306044*)

Модели адронных взаимодействий

- ***Модели, основанные на параметризации экспериментальных данных***
 - основаны на пакете GHEISHA
 - ***Модели, основанные на таблицах экспериментальных данных***
 - моделирование нейтронов низких энергий (от тепловых до 20 ГэВ)
 - ***Теоретико-феноменологические модели***
 - покрывают весь диапазон энергий до 100 ТэВ
 - высокие энергии – партонная и кварк-глюонная струнная модели
 - средние энергии – модели внутриядерных каскадов
 - ядерные модели для расчета фрагментации ядра и/или снятия возбуждения
-
-

Схема моделирования адрон-ядерных взаимодействий

Так как характер взаимодействий существенно различается в зависимости от энергии, то, как правило, при моделировании адрон-ядерных взаимодействий применяется следующая схема:

- моделируется «быстрая фаза»: взаимодействие налетающего адрона с ядром (при высоких энергиях — струнные модели, при средних энергиях — модели внутриядерного каскада)

Результат: конечные адроны + возбужденное ядро

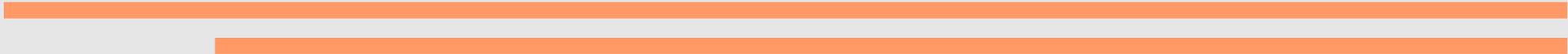
- моделируется фрагментация ядра (предравновесная модель, испарительная модель, ферми-развал, CHIPS ...)

Результат: адроны в конечном состоянии + продукты фрагментации или реакций перехода в основное состояние в ядре

Адронные взаимодействия остановившихся частиц

- **захват пиона** (G4PionMinusAbsorptionAtRest или G4PiMinusAbsorptionAtRest)
 - **захват каона** (G4KaonMinusAbsorptionAtRest или G4KaonMinusAbsorption)
 - **захват нейтрона** (G4NeutronCaptureAtRest)
 - **аннигиляция антипротона**
(G4AntiProtonAnnihilationAtRest)
 - **аннигиляция антинейтрона**
(G4AntiNeutronAnnihilationAtRest)
 - **мю-захват** (G4MuonMinusCaptureAtRest)
-
-

Модели адронных взаимодействий



GHEISHA

Fesefeldt, PITNA 85/02 Aachen

- Разыгрывается неупругое взаимодействие адрона с первым нуклоном в ядре
 - Конечное состояние определяется на основании продуктов первого взаимодействия, согласно параметризации экспериментальных данных
 - В варианте Geant4 существуют две параметризации:
 - **LE InteractionModel**: низкие энергии (до 20 ГэВ)
 - **HE Interaction Model**: высокие энергии (от 20 ГэВ до 100 ТэВ)
 - **RPG** = Re-parametrized GHEISHA (G4RPGInelastic) - *развивается*
 - Применима ко всем налетающим адронам. Высокая скорость вычислений, но точность расчетов невелика
 - Наборы процессов LHEP, LHEP_EMV
-
-

Струнные модели

- Применимы при высоких ($>10-50$ ГэВ) энергиях
 - Налетающая частица приводит к образованию в ядре кварк-глюонных струн
 - В результате разрыва струны образуются пары кварков, которые адронизуются согласно одной из моделей фрагментации (QGS или Lund)
 - После струнных моделей остаются образовавшиеся в результате адронизации адроны и «поврежденное» ядро. Для фрагментации ядра и снятия возбуждения применяются другие модели (precompound, CHIPS)
-
-

Кварк-глюонная струнная модель (QGSM)

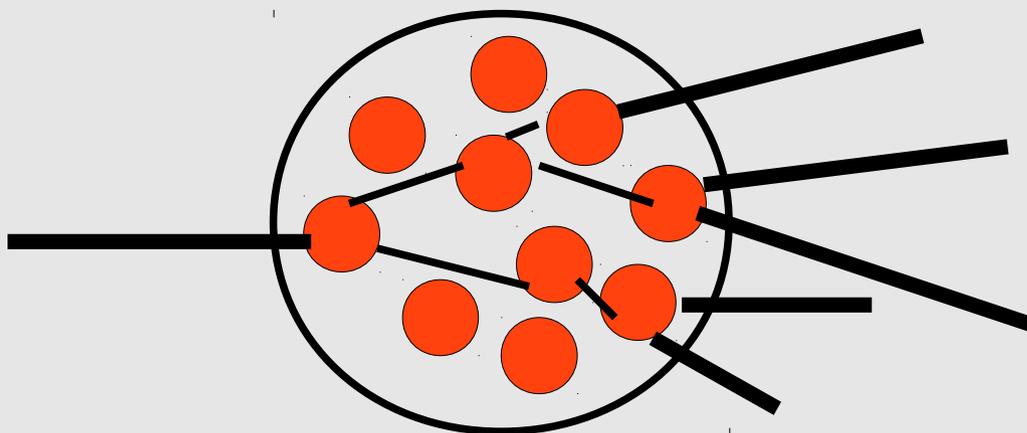
- Основана на модели, предложенной А.Кайдаловым (ИТЭФ)
 - Применима для **p, n, π, K**
 - Работает в диапазоне энергий **10-20 ГэВ – 100 ТэВ**
 - Модель обеспечивает
 - выбор сталкивающихся частиц
 - разделение нуклонов на кварки и дикварки
 - формирование и возбуждение кварк-глюонной струны
 - адронизацию струны
 - G4QGSMModel
 - Наборы процессов: QBBC QGS_BIC QGSC_BERT QGSC_CHIPS
QGSP_BERT_CHIPS QGSP_BERT_EMV QGSP_BERT_EMX
QGSP_BERT_HP QGSP_BERT QGSP_BERT_NOLEP
QGSP_BERT_TRV QGSP_BIC_EMV QGSP_BIC_HP QGSP_BIC
QGSP_FTFP_BERT QGSP QGSP_INCL_ABLA QGSP_QEL
-
-

Модель *FRITIOF*

- Основана на КХД и лундской струнной модели
Nilson-Almqvist, Comput.Phys.Commun.43:387,1987
 - Применима для **p, n, π, K**
 - Работает в диапазоне энергий **10-20 ГэВ – 100 ТэВ**
 - G4FTFModel
 - Наборы процессов **FTF_BIC FTFP_BERT_EMV**
FTFP_BERT_EMX FTFP_BERT FTFP_BERT_TRV
-
-

Внутриядерные каскады

- Алгоритм МВК предложен Сербером и Гольдбергером в 1947-1948 гг.
- Пределы применимости от **50-100 МэВ** до **5 - 10 ГэВ**
- Разыгрывается взаимодействие налетающей частицы с одним из нуклонов ядра
- Классическая траектория вторичных нуклонов прослеживается до следующего столкновения или до выхода из ядра
- МВК является практически единственной моделью, предсказывающей угловые распределения вторичных частиц



Внутриядерный каскад Бертини

- Основана на модели, предложенной Бертини в 1968 году
(*M.P. Guthrie, R.G. Alsmiller and H.W. Bertini, NIM 66 (1968) 29*)
 - Применима к **p, n, π, K, Λ, Σ, Ξ**
 - Диапазон энергий $0 < E < 10$ ГэВ
 - Классическая каскадная модель
 - нуклоны считаются свободными
 - распределение импульса нуклонов как для Ферми-газа
 - взаимодействие частиц с нуклонами ядра моделируется согласно экспериментально измеренным дифференциальным сечениям
-
-

Бинарный внутриядерный каскад

- Разработана Н.Р. Wellisch, V. Ivanchenko, G. Folger (CERN)
Eur. Phys. J. A21 (2004) 407
 - Применима к
 - **p, n** (в диапазоне $0 < E < \sim 3$ ГэВ)
 - **легким ядрам** (в диапазоне $0 < E < \sim 3$ ГэВ/нуклон)
 - **π -мезонам** (в диапазоне $0 < E < \sim 1.5$ ГэВ)
 - Гибрид классического каскада и моделей квантовой молекулярной динамики, учитывающей коллективные эффекты (реалистичное распределение плотности вещества в ядре)
 - Явно учитываются Δ и N^* резонансы
-
-

Льежский каскад INCL

- Каскадная модель INCL4
 - классический каскад
 - внутри ядра возможны упругое рассеяние, неупругое с образованием Δ , отражение на границе ядра
 - Для расчета ядерных реакций применяется алгоритм ABLA, моделирующий испарение фотонов и нуклонов и деление ядер
 - Предел применимости **40 МэВ — 2 ГэВ**
 - Конструкторы G4IonInclAblaPhysics, HadronPhysicsQGSP_INCL_ABLA
 - Набор QGSP_INCL_ABLA
-
-

Модель квантовой молекулярной динамики

- Основана на JQMD (*K. Niita et al. Phys. Rev. C52, 2620 (1995)*)
 - Ядра представлены как связанные системы нуклонов, взаимодействующих при помощи эффективных сил в рамках квантовой молекулярной динамики
 - Конструктор: G4QMDPhysics
 - Набор: Shielding
-
-

Модель кирального фазового объема (CHIPS)

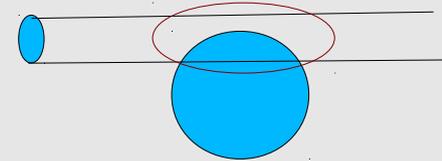
- CHIPS = Chiral Invariant Phase Space
 - Разработана М.Косовым (ИТЭФ)
 - Применяется для моделирования
 - захвата μ^- , π^- и K^- ядром
 - взаимодействия антибарионов с ядрами
 - взаимодействия фотонов и лептонов с ядрами
 - фрагментации ядра при совместном использовании с другими моделями
-
-

Модель кирального фазового объема (CHIPS)

- Ядро моделируется как единый объект, в котором в результате ядерных реакций возникают локальные возбуждения — квазимоны
 - Фрагментация ядра моделируется на кварк-партонном уровне даже при малых энергиях, с учетом кластеризации нуклонов в ядре
 - В модели рассматриваются безмассовые u , d , s кварки. Для моделирования каонов вводится дополнительный коэффициент подавления.
 - Процессы: G4QInelastic, G4QElastic,
 - Конструкторы: G4QAtomicPhysics G4QCaptureAtRestPhysics
G4QElasticPhysics G4QEmExtraPhysics G4QIonPhysics
G4QNeutrinoPhysics G4QPhotoNuclearPhysics G4QStoppingPhysics
-
-

Модели ядерных реакций

- Модель скалывания-срыва Вильсона
G4WilsonAbrasionModel,
G4WilsonAblationModel
- Электромагнитная диссоциация ядер (G4EMDissociation)
- Испарительная модель (классическая, GEM) (G4Evaporation)
- Предравновесная модель (Precompound)
- Фотонная испарительная модель (PhotonEvaporation)
- Мультифрагментация (G4StatMF, $E_{ex} > 5$ МэВ)
- Деление ядер:
 - Ферми-развал ($A < 17$)
 - Деление ($A > 65$)
 - модель спонтанного деления LLNL *(не доделана)*



Модели упругого рассеяния

Для описания упругого рассеяния адронов в Geant4 существуют 4 модели

- **LElastic** и **HElastic** (GHEISHA)
 - **LEnp**, **LEpp** (параметризация данных, 10 МэВ — 1,2 ГэВ)
 - **G4QuasiElasticChannel** — квазиупругое рассеяние в струнных моделях
 - **QElastic** (CHIPS) — *по умолчанию*
-
-

Взаимодействие нейтронов низких энергий

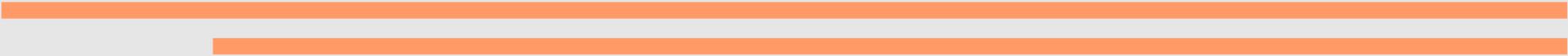
- Пределы применимости: 0.025 эВ - 20 МэВ
 - Упругое рассеяние (G4NeutronHPElasticData)
 - Захват (G4NeutronHPCaptureData)
 - Деление (G4NeutronHPFissionData)
 - Неупругое рассеяние (G4NeutronHPInelasticData)
 - Используются таблицы экспериментально измеренных сечений ENDF/B-VI
 - Конструкторы: HadronPhysicsQGSP_BERT_HP, HadronPhysicsQGSP_BIC_HP, G4HadronElasticPhysicsHP
 - Наборы: QGSP_BIC_HP, QGSP_BERT_HP
-
-

Взаимодействие ионов

Конструкторы:

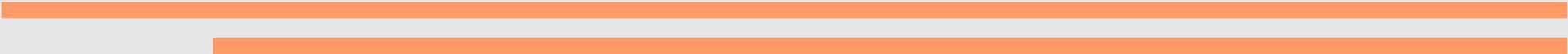
- **G4IonPhysics** — параметризация GHEISHA (только дейтроны, тритоны, альфа-частицы)
 - **G4IonBinaryCascadePhysics** — бинарный каскад (все ионы при $E < 20$ ГэВ, выше — GHEISHA (HE))
 - **G4IonInclAblaPhysics** — льежский каскад (только дейтроны, тритоны, He3 и альфа-частицы; $E < 3$ ГэВ/нуклон, выше - GHEISHA)
 - **G4IonQMDPhysics** — модель QMD (все ионы с энергией $100 \text{ МэВ} < E < 10 \text{ ГэВ}$; ниже — бинарный каскад, выше - GHEISHA)
-
-

Распады



Распады частиц

- Описаны в классе `G4Decay`
- Могут применяться ко всем частицам, кроме безмассовых частиц и короткоживущих резонансов
- Моды распада описаны в `G4DecayTable` для каждой частицы



Распад поляризованных мюонов

```
G4DecayTable* MuonPlusDecayTable = new G4DecayTable();
MuonPlusDecayTable -> Insert(new G4MuonDecayChannelWithSpin("mu+",1.00));
G4MuonPlus::MuonPlusDefinition() -> SetDecayTable(MuonPlusDecayTable);

G4DecayTable* MuonMinusDecayTable = new G4DecayTable();
MuonMinusDecayTable -> Insert(new G4MuonDecayChannelWithSpin("mu-",1.00));
G4MuonMinus::MuonMinusDefinition() -> SetDecayTable(MuonMinusDecayTable);

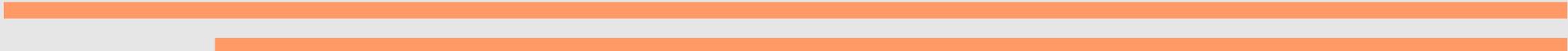
G4VProcess* fMuonDecayProcess = new G4DecayWithSpin("DecayWithSpin");
G4VProcess* fPionDecayProcess = new G4PionDecayMakeSpin("PionDecayMakesSpin");

    ...

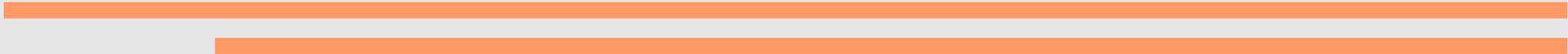
if (particle->GetParticleName() == "mu+" || particle->GetParticleName() == "mu-")
    pmanager -> AddProcess(fMuonDecayProcess);
else if (particle->GetParticleName() == "pi+" || particle->GetParticleName() == "pi-")
    pmanager -> AddProcess(fPionDecayProcess);
```

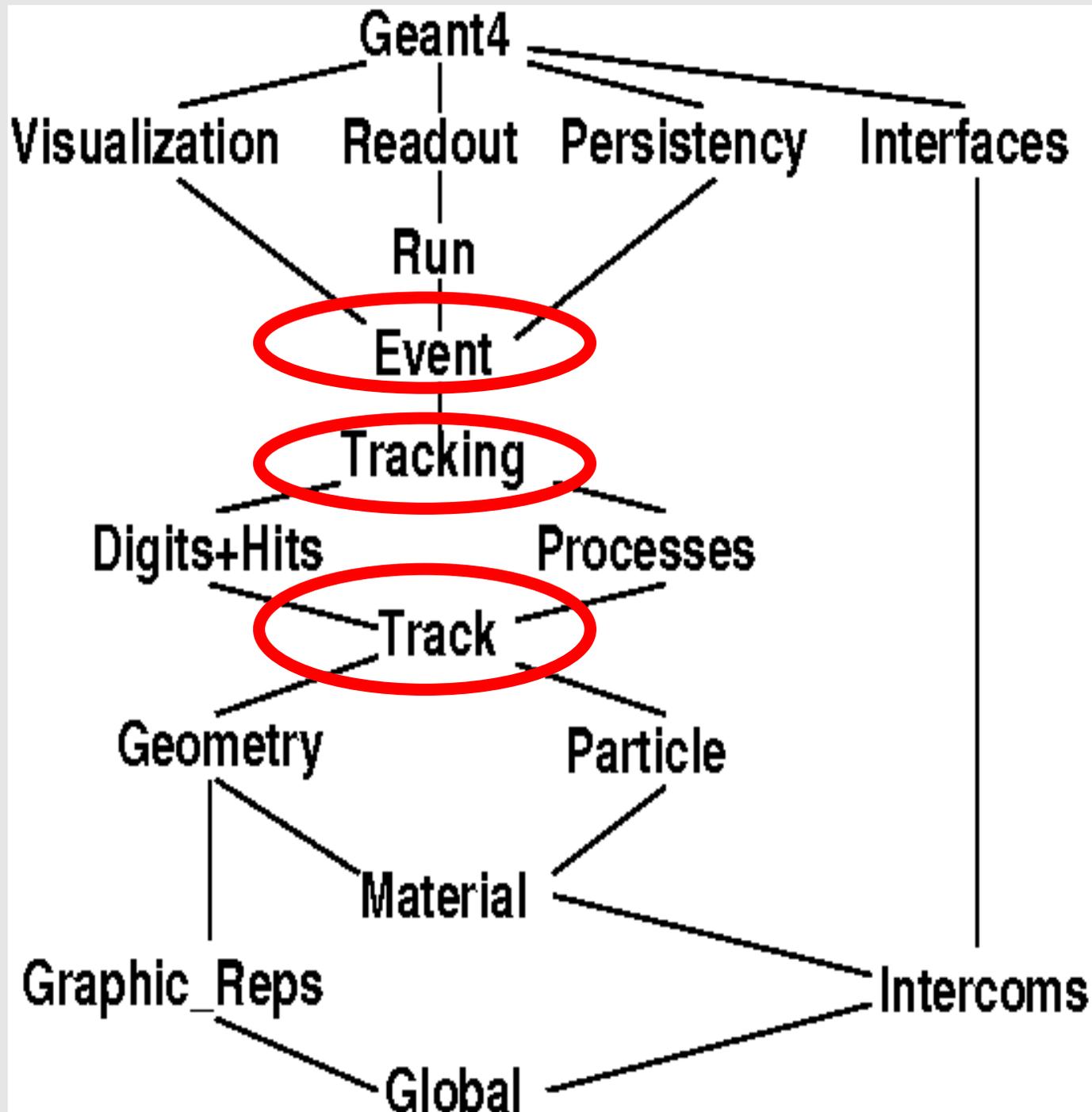
Радиоактивные распады ядер

- Отдельный процесс G4RadioactiveDecay
- Данные о распадах для каждого изотопа берутся из таблиц
- Конструктор G4RadioactiveDecayPhysics



Трекинг





Как происходит один шаг в моделировании (1)

1. Считается скорость частицы в начале шага
 2. Определяется длина свободного пробега независимо для каждого активного процесса. Выбирается наименьшая.
 3. Рассчитывается расстояние до граничной поверхности ближайшего объема. Если это расстояние больше, чем наименьшее определенное для физических процессов, выбирается последнее, и дальнейшие геометрические расчеты не делаются
-
-

Как происходит один шаг в моделировании (2)

4. Производится расчет непрерывных взаимодействий согласно длине шага, и соответственно в конце изменяется значение кинетической энергии
 5. Производится проверка, стоит ли продолжать трекинг данной частицы
 6. Обновляются параметры частицы (энергия и положение)
 7. Производится расчет дискретных процессов. Если требуется, создается список вторичных частиц.
-
-

Как происходит один шаг в моделировании (3)

8. Производится проверка, стоит ли продолжать трекинг данной частицы
 9. Рассчитывается расстояние до граничной поверхности ближайшего объема.
 10. Если шаг ограничен этой поверхностью, происходит переход в следующий объем
 11. Производятся действия, определяемые пользователем (`G4UserSteppingAction`) и обрабатывается информация в детектирующих элементах
 12. Добавляется точка в траектории движения
-
-

Действия, определяемые пользователем

- Классы-наследники G4UserTrackingAction и G4UserSteppingAction
 - G4UserTrackingAction: для каждого трека (до и после трекинга частицы) вызываются методы соответственно:
 - *virtual void PreUserTrackingAction(const G4Track*)*
 - *virtual void PostUserTrackingAction(const G4Track*)*
 - G4UserSteppingAction: на каждом шаге вызывается метод
 - *virtual void UserSteppingAction(const G4Step*)*
-
-

UserStackingAction

- Дает возможность управлять порядком трекинга частиц (аналог триггера)
 - Обычный алгоритм:
 - частица тянется до остановки, исчезновения в реакции или границы мирового объема
 - все произведенные ей вторичные частицы помещаются в стек (есть два стека: **UrgentStack** и **WaitingStack**)
 - по умолчанию, все треки помещаются в UrgentStack
 - последняя рожденная частица трассируется первой
 - для третичных и т. д. применяется аналогичная схема
 - UserStackingAction: наследник **G4UserStackingAction**
 - void PrepareNewEvent();*
инициализация перед новым событием
 - G4ClassificationOfNewTrack ClassifyNewTrack(const G4Track*);*
определение приоритета обработки данного трека
 - void NewStage();*
действия после обработки UrgentStack
-
-

Пределы, устанавливаемые пользователем (UserLimits)

- Применяются в целях оптимизации
 - Могут устанавливаться для отдельных частиц и отдельных логических объемов
 - Позволяют устанавливать
 - **максимально допустимую длину шага**
 - **максимальную длину трека**
 - **максимальное время жизни**
 - **минимальную кинетическую энергию**
 - **минимальное расстояние пролета**
-
-

Примеры UserLimits (1)

Принудительное ограничение длины шага:

В UserAppDetectorConstruction:

```
G4double maxStep = 0.1*cm;
```

```
logicTracker->SetUserLimits(new G4UserLimits(maxStep));
```

В UserAppPhysicsList

```
pmanager->AddDiscreteProcess(new G4StepLimiter);
```

Примеры UserLimits (2)

Более общая конструкция:

В UserAppDetectorConstruction

```
G4double maxTime = 10*ms;
```

```
logicTracker->SetUserLimits(new
```

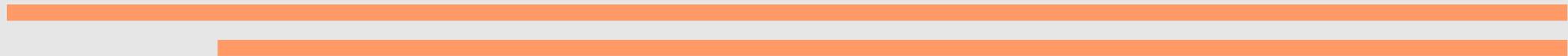
```
    G4UserLimits(DBL_MAX,DBL_MAX,maxTime));
```

В UserAppPhysicsList

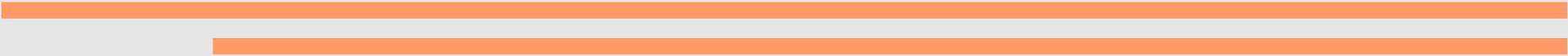
```
G4ProcessManager* pmanager =
```

```
    G4Neutron::Neutron->GetProcessManager();
```

```
pmanager->AddProcess(new G4UserSpecialCuts(),-1,-1,1);
```

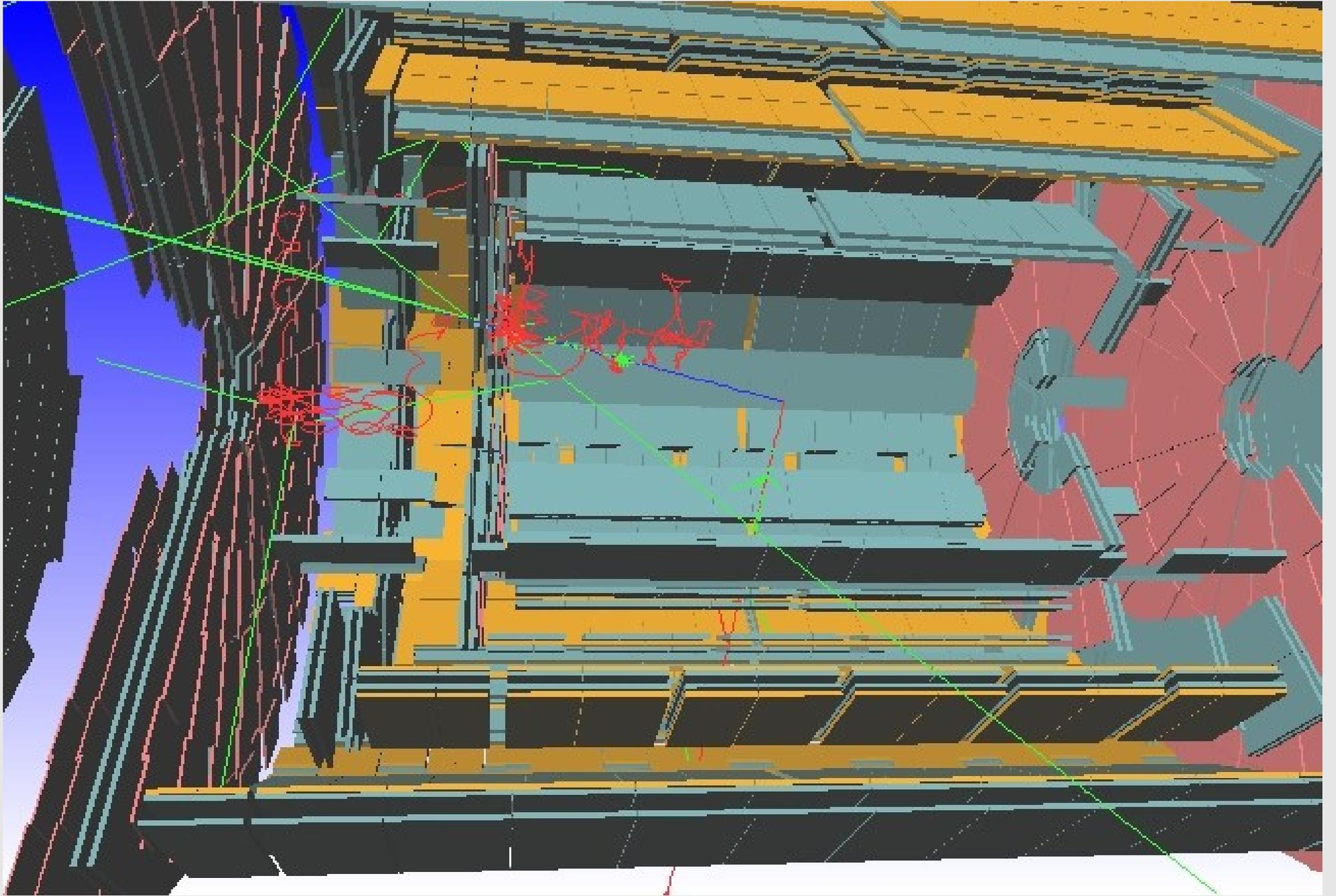


Заключительные замечания



Особенности моделирования в больших экспериментах

- Сложные детекторы
 - большое (1000-1000000) число объемов
 - сложная геометрия объемов
 - Обширная физическая программа
 - множество моделей физических процессов
 - различные цели моделирования = различные наборы существенных физических процессов, различные модели для разных G4Regions
 - Сложное программное обеспечение
 - работа в составе программной оболочки (framework)
 - внешний, единый для программ моделирования и реконструкции, банк геометрических параметров детектора и калибровочных констант
 - единый подход к сохранению данных
-
-



Преимущества и недостатки Geant4

Преимущества

- все преимущества C++: гибкость, расширяемость, модульная структура, ...
 - гибкий и мощный аппарат описания геометрии
 - универсальное описание практически всех известных взаимодействий элементарных частиц в веществе
 - вполне достоверное моделирование физических процессов при высоких энергиях
 - минимум лицензионных ограничений, открытый код
-
-

Преимущества и недостатки Geant4

Недостатки

- Сложность выбора или составления адекватного набора физических процессов
 - Недостаточно верифицированные модели физических взаимодействий при средних и низких энергиях (≤ 100 МэВ для ЭМ и ≤ 10 ГэВ для сильных взаимодействий). В связи с этим, точные расчеты в этой области требуют дополнительно предварительной проверки адекватности используемых моделей
 - Недостаточная встроенная оптимизация для ряда прикладных задач
 - Отсутствие встроенных средств сохранения результатов моделирования
 - Ограниченные возможности GUI и определенные трудности с визуализацией
-
-

Ожидаемые ближайшие перспективы развития Geant4

- Уточнение и верификация моделей физических процессов, особенно в области низких энергий и сверхвысоких энергий
 - *новые экспериментальные данные*
 - *новые модели*
 - *уточнение теоретических расчетов*
 - Упрощение описания сложной геометрии
 - *использование универсального формата описания геометрии (GDML) (подробно <http://cern.ch/gdml>)*
 - *описание новых форм*
 - Оптимизация для решения прикладных задач
 - *Переменная плотность вещества*
 -
-
-

Перспективы применения Geant4

- Основной инструмент моделирования в физике элементарных частиц в ближайшие 10 лет
- Растущее применение в ядерной физике
- Растущее применение в медицинской физике
- Потенциально широкое применение в прикладных исследованиях (исследование радиационной эффектов в веществе, расчет защиты космических аппаратов и т.д.)