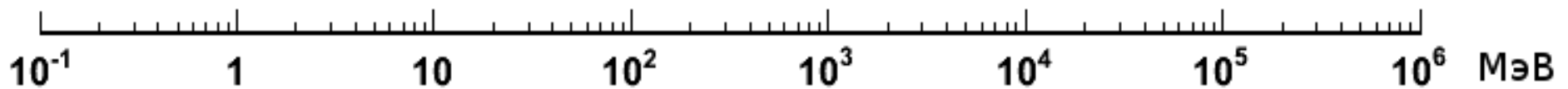


# *Взаимодействия адронов*

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

- Параметризация Барашенкова-Грибова-Глаубера
  - выше 100 ГэВ — модель Глаубера-Грибова  
*V. M. Grichine. A simplified Glauber model for hadron–nucleus cross sections. EPJC 62 (2) :399–404 2009.*
  - ниже — параметризация Барашенкова (ОИЯИ)  
<http://www.oecd-nea.org/dbdata/bara.html>

## 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\_\*

# 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 адронизируются 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)

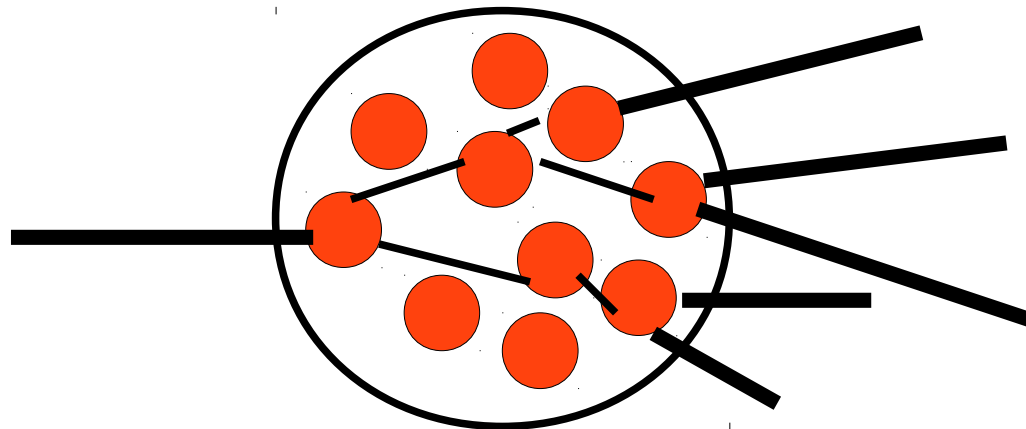
- Основана на модели, предложенной А.Кайдаловым (ИТЭФ)
- Применима для **p, n, π, K**
- Работает в диапазоне энергий **10-20 ГэВ – 100 ТэВ**
- Модель обеспечивает
  - выбор сталкивающихся частиц
  - разделение нуклонов на кварки и дикварки
  - формирование и возбуждение кварк-глюонной струны
  - адронизацию 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\_EMY 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)
  - **$\pi$ -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  $\Delta$  и  $N^*$  резонансы

# Льежский каскад INCL

- Каскадная модель INCL4
  - классический каскад
  - внутри ядра возможны упругое рассеяние, неупругое с образованием  $\Delta$ , 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)*)
- Метод основан на численном решении уравнений движения нуклонов в ядре. Все нуклоны взаимодействуют друг с другом посредством заданного эффективного потенциала взаимодействия.
- Конструктор: G4QMDPhysics
- Набор: Shielding

# *Модель кирального фазового объема (CHIPS)*

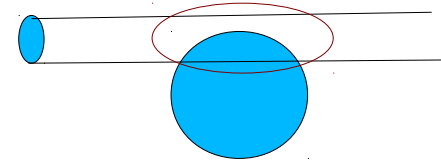
- CHIPS = Chiral Invariant Phase Space
- Разработана М.Косовым (ИТЭФ)
- Применяется для моделирования
  - захвата  $\mu^-$ ,  $\pi^-$  и  $K^-$  ядром
  - взаимодействия антибарионов с ядрами
  - взаимодействия фотонов и лептонов с ядрами
  - фрагментации ядра при совместном использовании с другими моделями

# 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 (сечение определяется по модели Глаубера)
- **QElastic** (CHIPS)

# *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 G4NDL на основе таблиц оцененных нейтронных данных ENDF/B-VII (417 изотопов)
- Конструкторы: HadronPhysicsQGSP\_BERT\_HP, HadronPhysicsQGSP\_BIC\_HP, G4HadronElasticPhysicsHP
- Наборы: QGSP\_BIC\_HP, QGSP\_BERT\_HP

## Достоверность

- Надежный расчет транспорт нейтронов (рассеяние, захват)
- Моделирование реакций  $(n, n')$ ,  $(n, 2n)$ ,  $(n, 3n)$  обычно достоверно, но в случае рождения нескольких нейтронов энергия и углы вылета могут не коррелировать
- Моделирование реакций с образованием заряженных частиц или гамма-квантов может быть неточным
- В целом, в многочастичных реакциях закон сохранения энергии-импульса может не выполняться.

## Рассеяние тепловых нейтронов

Для корректного учета рассеяния тепловых нейтронов нужно либо создавать материалы на основе библиотеки NIST, либо использовать **названия** из следующего списка:

TS_Aluminium_Metal	TS_O_of_Uranium_Dioxide
TS_Beryllium_Metal	TS_O_of_Beryllium_Oxide
TS_Be_of_Beryllium_Oxide	TS_U_of_Uranium_Dioxide
TS_C_of_Graphite	TS_Zr_of_Zirconium_Hydride
TS_D_of_Heavy_Water	TS_H_of_Para_Hydrogen
TS_H_of_Water	TS_H_of_Ortho_Hydrogen
TS_H_of_Zirconium_Hydride	TS_D_of_Para_Deuterium
TS_H_of_Polyethylene	TS_D_of_Ortho_Deuterium
TS_Iron_Metal	TS_H_of_Liquid_Methane
	TS_H_of_Solid_Methane
	TS_Benzene



## Альтернативные таблицы сечений

<https://www-nds.iaea.org/geant4/>

- BROND-2.2
- CENDL-31
- ENDF-B/VI.8
- ENDF-B/VII.0
- JEFF-3.0
- JEFF-3.1
- JENDL-3.3
- JENDL-4.0

Применение:

```
export G4NEUTRONHPDATA=/path/to/data/files/CENDL-31
```

## Полезные переменные окружения

### G4NEUTRONHP\_SKIP\_MISSING\_ISOTOPES

- если объявлена, то в случае отсутствия сечений для данного изотопа в таблице используются сечения для природной смеси, и 0 если их тоже нет
- если не объявлена, используется ближайший по  $Z$  и  $A$  элемент с известными сечениями

### G4NEUTRONHP\_DO\_NOT\_ADJUST\_FINAL\_STATE

- если не объявлена, для выполнения закона сохранения энергии-импульса могут рождаться «лишние» гамма-кванты

### G4NEUTRONHP\_PRODUCE\_FISSION\_FRAGMENTS

- моделируется образование осколков деления ядра-мишени

# LEND

- Альтернатива NeutronHP в Geant4
- Представляет собой интерфейс к GIDI - новому формату ядерных данных, разработанному в LLNL
- Реализация в соответствии с архитектурой адронных процессов в Geant4 (разделение полного сечения и моделирования конечного состояния)
- Содержит данные для нескольких температур:  
300, 1160 и 3590 К
- Файлы с оцененными данными распространяются независимо от Geant4

# 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  $100 \text{ МэВ} < E < 10$  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