

Электромагнитные процессы

- Основные электромагнитные процессы описаны в двух библиотеках: **Standard** и **LowEnergy**
- **Standard** — описание ЭМ процессов для решения задач ФВЭ (применимы до 100 ТэВ)
- **LowEnergy** — более точное описание процессов при низких энергиях (учет атомных эффектов и т. п.), применяется для решения прикладных задач (микродозиметрия, медицинские приложения и т. д.)
- Для обеих библиотек разработан единый интерфейс: все процессы являются наследниками одного из классов:

G4VEnergyLoss

G4VEmProcess

G4VMultipleScattering

Кроме того, существуют дополнительные библиотеки:

- **Polarisation**
 - Процессы с поляризованными частицами
- **Xray**
 - Синхротронное излучение (G4SynchrotronRadiation)
 - Переходное излучение (G4TransitionRadiation)
 - Оптические процессы
- **Фотон-ядерные и электрон-ядерные взаимодействия**

«Стандартный» набор электромагнитных процессов

- **Фотонные процессы**
 - Комптон-эффект (G4ComptonScattering)
 - рождение пар (G4GammaConversion)
 - фотоэффект (G4PhotoElectricEffect)
 - рождение мюонных пар (G4GammaConversionToMuons)
- **Электрон-позитронные процессы**
 - ионизация и рождение дельта-электронов (G4eIonisation)
 - тормозное излучение (G4eBremsstrahlung)
 - аннигиляция позитрона (G4eplusAnnihilation)
 - аннигиляция позитрона в 2 мюона (G4AnnihiToMuPair)
 - аннигиляция позитрона в адроны (G4eeToHadrons)
- **Мюонные процессы**
 - ионизация и рождение дельта-электронов (G4MuIonisation)
 - тормозное излучение (G4MuBremsstrahlung)
 - рождение пар (G4MuPairProduction)
- **ЭМ процессы с ионами и адронами**
 - ионизация адронами (G4hIonisation)
 - ионизация ядрами (G4ionEnergyLoss)
- **Множественное рассеяние**
 - для всех заряженных частиц (G4MultipleScattering)

Набор электромагнитных процессов для низких энергий

Фотонные и электрон-позитронные процессы (250 эВ — 1 ГэВ)

- Модели PENELOPE (**PE**Netration and **E**nergy **LO**ss of **P**ositrons and **E**lectrons) — теоретическое описание, основанное на экспериментальных данных
- Модели Livermore — параметризация экспериментальных данных
- Рассеяние Рэля для фотонов (G4RayleighScattering)

Ионизация

- Тормозная способность задана по параметризации ICRU49 (по умолчанию), или по модели Ziegler
Более подробно описано на <http://www.ge.infn.it/geant4/lowE>
- Ионизация тяжелыми частицами: G4BraggModel, G4BraggNoDeltaModel, G4BetheBlochNoDeltaModel)
- Ионизация в тонком слое (G4PAIModel)

Микродозиметрия (7 эВ — 10 МэВ) — проект Geant4-DNA

- Расчет эффектов в воде, сравнимых с энергией связи в молекуле ДНК
Подробнее: S. Chauvie, IEEE Trans. Nucl. Sci. 54 (2007) 2619

MicroElec

- взаимодействия в кремнии для частиц с энергией от нескольких эВ

Источники данных о сечениях процессов и энергии электронных оболочек (Livermore и PENELOPE)

- EPDL97 (Evaluated Photons Data Library)
- EEDL (Evaluated Electrons Data Library)
- EADL (Evaluated Atomic Data Library)

<https://www-nds.iaea.org/epdl97/>

- EPICS2014 (Evaluated Photons Data Library)

<https://www-nds.iaea.org/epics2014/>

Взаимодействия гамма-квантов

Процесс	Модели	
G4PhotoElectricEffect	G4PEEffectFluoModel G4LivermorePhotoElectricModel G4LivermorePolarizedPhotoElectricModel G4PenelopePhotoElectricModel	
G4PolarizedPhotoElectricEffect	G4PolarizedPEEffectModel	
G4ComptonScattering	G4KleinNishinaCompton - самая быстрая G4KleinNishinaModel G4LivermoreComptonModel G4LivermoreComptonModelRC G4LivermorePolarizedComptonModel G4LowEPComptonModel G4PenelopeComptonModel	
G4PolarizedCompton	G4PolarizedComptonModel	
G4GammaConversion	G4BetheHeitlerModel G4PairProductionRelModel G4LivermoreGammaConversionModel G4BoldyshevTripletModel G4LivermoreNuclearGammaConversionModel G4LivermorePolarizedGammaConversionModel G4PenelopeGammaConversion	
G4PolarizedGammaConversion	G4PolarizedGammaConversionModel	
G4RayleighScattering	G4LivermoreRayleighModel G4LivermorePolarizedRayleighModel G4PenelopeRayleighModel	
G4GammaConversionToMuons		

Взаимодействие заряженных частиц с веществом

Ионизация и тормозное излучение

Процесс	Модели
G4eIonisation	G4MollerBhabhaModel G4LivermoreIonisationModel G4PenelopeIonisationModel G4PAIModel G4PAIPhotModel
G4ePolarizedIonisation	G4PolarizedMollerBhabhaModel
G4MuIonisation	G4MuBetheBlochModel G4PAIModel G4PAIPhotModel
G4hIonisation	G4BetheBlochModel G4BraggModel G4ICRU73QOModel G4PAIModel G4PAIPhotModel
G4ionIonisation	G4BetheBlochModel G4BetheBlochIonGasModel G4BraggIonModel G4BraggIonGasModel G4IonParametrisedLossModel

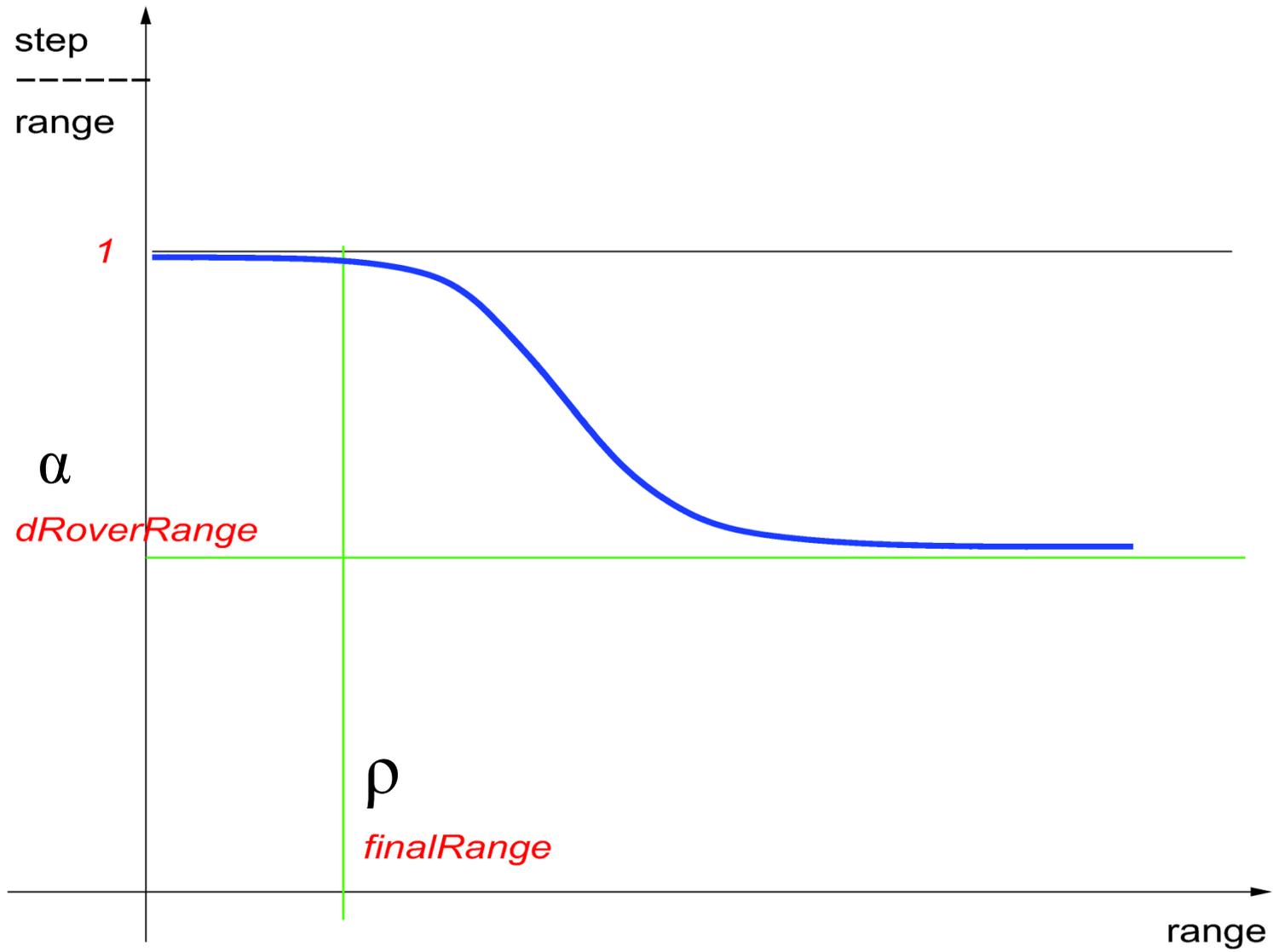
G4NuclearStopping	G4ICRU49NuclearStoppingModel
G4mpIonisation <i>магнитный монополь</i>	G4mpIonisationWithDeltaModel
G4eBremsstrahlung	G4SeltzerBergerMode G4eBremsstrahlungRelModel G4LivermoreBremsstrahlungModel G4PenelopeBremsstrahlungModel
G4ePolarizedBremsstrahlung	G4PolarizedBremsstrahlungModel
G4MuBremsstrahlung	G4MuBremsstrahlungModel
G4hBremsstrahlung	G4hBremsstrahlungModel
G4ePairProduction	G4MuPairProductionModel
G4MuPairProduction	G4MuPairProductionModel
G4hPairProduction	G4hPairProductionModel

- Моделирование ионизации в Geant4 имеет непрерывную (dE/dx) и дискретную (δ -электроны, тормозное излучение) компоненты. Соотношение регулируется значением порога рождения вторичных частиц.
- При моделировании ионизационных потерь на шаге, принимаются во внимание флуктуации потерь
- Баланс «точность — скорость вычислений» достигается использованием функции шага:

$$\text{Длина шага} = \max(\rho, \alpha R(E) + \rho(1-\alpha)(2-\rho/R(E)))$$

где ρ — минимальная длина шага (1 мм по умолчанию)

α — параметр (по умолчанию 0,2), $R(E)$ - пробег частицы для данной энергии.



Коррекция функции шага при создании набора процессов:

```
G4eIonisation* eIoni = new G4eIonisation();  
eIoni->SetStepFunction(0.2, 100*um);
```

или в командной строке

```
/process/eLoss/StepFunction 0.2 100 um
```

Многократное рассеяние

- Вместо моделирования отдельного акта рассеяния, вычисляется среднее смещение частицы, соответствующее длине шага
- По умолчанию, применяется модель Урбана (L.Urban, CERN-OPEN-2006-077)
 - *Параметризация данных по рассеянию электрона, отдельно для центральной области углового распределения и отдельно для «хвостов»*
 - *Баланс «точность-быстродействие» оптимален для ФВЭ, но точность часто недостаточна при моделировании ЭМ-калориметров*
- Существуют две альтернативные теоретические модели
 - *Модель Goudsmit-Saunderson (O.Kadri et al., NIM B267 (2009) 3624) наиболее точна для расчета рассеяния электронов. Примерно вдвое медленнее чем модель Урбана*
 - *Модель WentzelVI пригодна для расчета многократного рассеяния в разреженных средах*

PIXE, флуоресценция, оже-электроны

В результате взаимодействия гамма-кванта или заряженной частицы атом может остаться в возбужденном состоянии

- **PIXE = Particle Induced X-ray Emission**

M. G. Pia et al., PIXE simulation with Geant4, IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 56, no. 6, pp. 3614-3649, 2009

- **Характеристическое рентгеновское излучение (флуоресценция)**
- **Выбивание Оже-электронов**

/process/em/deexcitationIgnoreCut true

/process/em/fluo true

/process/em/pixe true

/process/em/augetrue true

/process/em/augetrueCascade true

Оптические процессы

- Фотон моделируется как оптический, если его длина волны много больше размера атома.
- В Geant4 оптический фотон и гамма-квант – две разные частицы.
- Оптические фотоны в Geant4 моделируются без учета сохранения энергии
- Для материалов требуется описывать оптические свойства

Оптические процессы

В Geant4 описаны процессы

- излучение Вавилова-Черенкова (G4Cerenkov)
- сцинтилляция (G4Scintillation)
- смещение длины волны (G4OpWLS)
- поглощение фотонов (G4OpAbsorption)
- рассеяние Рэля (G4OpRayleigh)
- граничные эффекты (G4OpBoundaryProcess)

Оптические свойства материала

- В материалах, оптические свойства которых не заданы, оптические фотоны не моделируются
- Необходимо создать объект `G4MaterialPropertiesTable`, заполнить в нем таблицы оптических свойств и передать его в соотв. объект класса `G4Material`

```
G4MaterialPropertiesTable* MPT1 = new G4MaterialPropertiesTable();
```

```
Water->SetMaterialPropertiesTable(MPT1);
```

- Основные таблицы оптических свойств:
 - `RINDEX` - показатель преломления (в зависимости от энергии фотона)
 - `ABSLENGTH` - Длина поглощения (в зависимости от энергии фотона)
- Дополнительные свойства для сцинтилляции, Ми-рассеяния.

Конструкторы ЭМ процессов (основные для ФВЭ)

- **G4EmStandardPhysics** (*применяется по умолчанию*)

Разработан для эксперимента ATLAS на LHC

- **G4EmStandardPhysics_option1**

Разработан для эксперимента CMS на LHC

Более быстрые расчеты, из-за более простой оценки длины шага. Не очень хорош для моделирования ЭМ сэмплинг-калориметров

- **G4EmStandardPhysics_option2**

Модель многократного рассеяния WentzelVI

- **G4EmStandardPhysicsGS**

Модель Goudsmit-Saunderson для многократного рассеяния электронов ниже 100 МэВ. Менее точные, но более быстрые расчеты чем **G4EmStandardPhysics_option4**

Конструкторы ЭМ процессов (комбинированные ФВЭ+низкие энергии)

- **G4EmStandardPhysics_option3**

Многократное рассеяние: применяется модифицированная модель Урбана
Скорректированы параметры функции шага для ионизации (0.2, 100 мкм)

- **G4EmLivermorePhysics**

Многократное рассеяние: модель Godsmi-Saunderson

Для γ , e^\pm ниже 1 GeV — модели Livermore, выше - Standard

- **G4EmPenelopePhysics**

Многократное рассеяние: модель Godsmi-Saunderson

Для γ , e^\pm ниже 1 GeV — модели PENELOPE, выше — Standard

- **G4EmLowEPPhysics**

При низких (<20 МэВ) энергиях применяется модель Университета Монаша

- **G4EmStandardPhysics_option4**

комбинация Penelope и Livermore

Многократное рассеяние: модель Godsmi-Saunderson

Конструкторы ЭМ процессов (дополнительные)

- **G4EmLivermorePolarizedPhysics**
Процессы с поляризованными фотонами
- **G4EmExtraPhysics**
Синхротронное излучение
Фото- и электроядерные процессы
- **G4OpticalPhysics**
оптические процессы
- **Набор конструкторов G4EmDNAPhysics**
радиобиология

Geant4-DNA

- Проект основан Dr. P. Nieminen из Европейского космического агентства
- Набор физических моделей для расчета взаимодействия заряженных частиц в воде с энерговыделением ~ нескольких эВ
 - электроны, ионы водорода (H^0 , H^+) и ионы гелия (He^0 , He^+ , He^{2+})
 - Li (3,7), Be (4,9), B (5,11), C (6,12), N (7,14), O (8,16), Si (14,28), Fe (26,56)
- Первоначально нацелен на расчеты для микродозиметрии
- В настоящее время попытки применить для радиобиологических расчетов:
 - радиоллиз воды
 - радиационные повреждения белков
 - повреждения ДНК
- Основные сложности: недостаток экспериментальных данных, описание геометрии, продолжительность вычислений

TABLE I. List of GEANT4-DNA physics processes for liquid water and for all associated particles, which will be fully available in the 2010 release of the GEANT4 Monte Carlo toolkit. Process and model classes are indicated, as well as the applicability energy range of each model class. Low energy limits in bold give the energy threshold below which the incident particle is stopped and deposits its total energy to the liquid (for the other models, the incident particle with an incident energy below the low energy limit does not interact with the medium and is left unchanged). The type of model (analytical or based on interpolated data tables) is also listed.

Physical process	GEANT4 process class	GEANT4 model class	Low energy limit	High energy limit	Model type
Electron					
Elastic scattering	G4DNAElastic	G4DNAScreenedRutherfordElasticModel	9 eV	1 MeV	Analytical
		G4DNAChampionElasticModel	9 eV	1 MeV	Interpolated
Excitation	G4DNAExcitation	G4DNABornExcitationModel	9 eV	1 MeV	Interpolated
Ionisation	G4DNAIonisation	G4DNABornIonisationModel	11 eV	1 MeV	Interpolated
Proton					
Excitation	G4DNAExcitation	G4DNAMillerGreenExcitationModel	10 eV	500 keV	Analytical
		G4DNABornExcitationModel	500 keV	100 MeV	Interpolated
Ionisation	G4DNAIonisation	G4DNARuddIonisationModel	100 eV	500 keV	Interpolated
		G4DNABornIonisationModel	500 keV	100 MeV	Interpolated
Charge decrease	G4DNAChargeDecrease	G4DNADingfelderChargeDecreaseModel	100 eV	10 MeV	Analytical
¹H (neutral atom)					
Ionisation	G4DNAIonisation	G4DNARuddIonisationModel	100 eV	100 MeV	Interpolated
Charge increase	G4DNAChargeIncrease	G4DNADingfelderChargeIncreaseModel	100 eV	10 MeV	Analytical
⁴He²⁺					
Excitation	G4DNAExcitation	G4DNAMillerGreenExcitationModel	1 keV	400 MeV	Analytical
Ionisation	G4DNAIonisation	G4DNARuddIonisationModel	1 keV	400 MeV	Interpolated
Charge decrease	G4DNAChargeDecrease	G4DNADingfelderChargeDecreaseModel	1 keV	10 MeV	Analytical
⁴He⁺					
Excitation	G4DNAExcitation	G4DNAMillerGreenExcitationModel	1 keV	400 MeV	Analytical
Ionisation	G4DNAIonisation	G4DNARuddIonisationModel	1 keV	400 MeV	Interpolated
Charge decrease	G4DNAChargeDecrease	G4DNADingfelderChargeDecreaseModel	1 keV	10 MeV	Analytical
Charge increase	G4DNAChargeIncrease	G4DNADingfelderChargeIncreaseModel	1 keV	10 MeV	Analytical
⁴H (neutral atom)					
Excitation	G4DNAExcitation	G4DNAMillerGreenExcitationModel	1 keV	400 MeV	Analytical
Ionisation	G4DNAIonisation	G4DNARuddIonisationModel	1 keV	400 MeV	Interpolated
Charge increase	G4DNAChargeIncrease	G4DNADingfelderChargeIncreaseModel	1 keV	10 MeV	Analytical

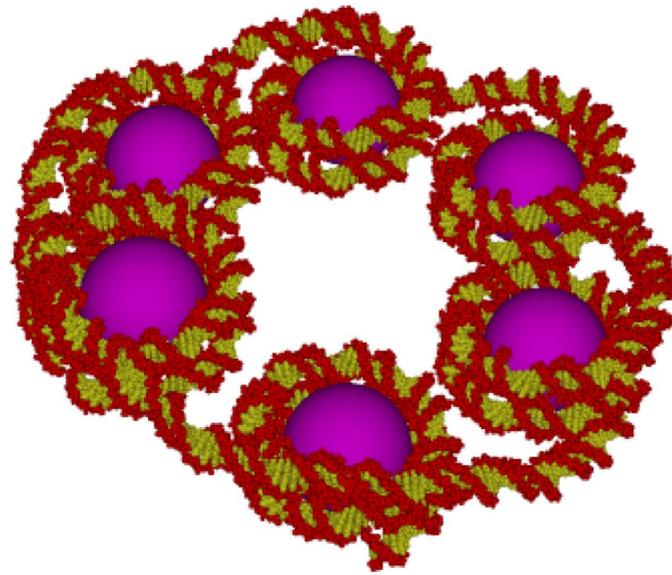
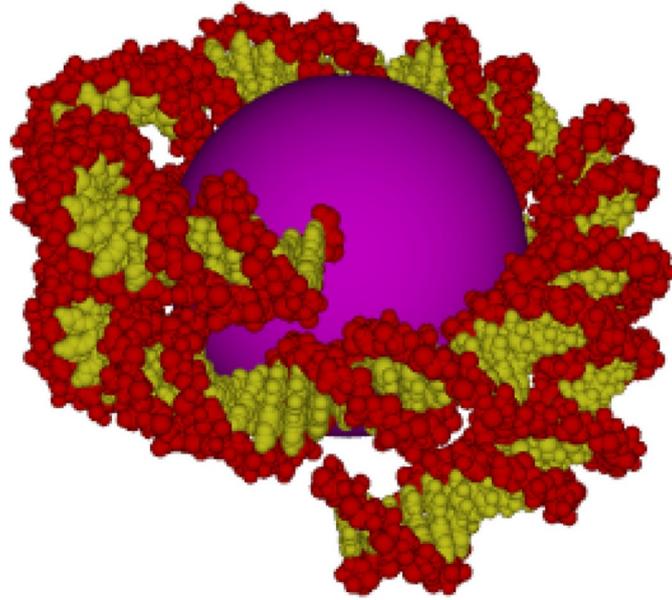


Figure 6. Nucleosome (top) and 30-nm chromatin fiber (bottom) of the B-DNA atomistic model (see [83] for more details).