

加速器施設、特に高エネルギー加速器施設においては様々な放射線が発生する。どの様な放射線を考慮しなければならないかという事は、加速粒子の種類、エネルギー及び対象とする問題によって異なる。本講義においては、加速器施設における放射線の概要とそれを扱うシュミレーションコードの概要を紹介する。

## 1 加速器施設における放射線

### 1.1 ハドロン加速器

高エネルギーの陽子や重イオンが物質に入射すると原子核内の核子との相互作用により核子を原子核外に放出し(核内カスケード)、放出された核子が再び原子核と相互作用をしながら個々の粒子のエネルギーを下げながら粒子数を増やしていく現象を「核外カスケード」と呼ぶ。核内カスケードでは高いエネルギーの核子を放出した後蒸発過程によりエネルギーの陽子や中性子が放出される。高エネルギーの核子は、エネルギーが約20MeV以下になるとカスケードを生じる事ができなくなり、低エネルギーの核反応によりエネルギーを失っていき最終的には熱の形で吸収される。核内カスケードにより中性の $\pi$ 中間子( $\pi^0$ )が生成するとその崩壊により高エネルギーの光子が発生し、後で述べる電磁カスケードが起きる。第1.1図にハドロンカスケードの発達の様子を示す。

#### 1.1.1 考慮すべき放射線

どの様な種類の放射線が重要かは検討する問題により異なる。

1. 放射線遮蔽  
透過力の強い中性子、特に高エネルギー中性子の減衰が最も重要である。
2. 機器や構造体の放射化  
機器や構造体の放射化では、核内カスケードの残留核が最も重要であるが、材質によっては速中性子( $\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ )や、熱中性子による反応( $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$ )も考慮する必要がある。
3. 機器の損傷  
核内カスケードを生じた核(star)の分布が最も直接関係すると考えられる。

### 1.2 電子加速器

高エネルギーの電子が物質に入射すると制動輻射により高エネルギーの光子を生成する。高エネルギーの光子は、電子対生成により、電子と陽電子を生成し、生成した電子と陽電子がまた制動輻射により光子を生成していく。この様に制動輻射と電子対生成の繰り返しによって電子・陽電子及び光子がエネ

ルギーを失いながら数を増やしていく現象を「電磁カスケード」と呼ぶ。光子のエネルギーが高い場合には、主として電子対生成が起きるが、エネルギーが下がっていくに従ってコンプトン散乱や光電吸収の割合が増加し、最終的には光電吸収により吸収される。断面積は小さいが光核反応や光中間子生成反応と呼ばれる反応によって中性子が生成される。第1.1表に光子による反応の種類を示す。光子のエネルギーと光核反応と光中間子生成反応断面積の関係を第1.2図に示す。

電子・陽電子は、第1.3図に示すように、エネルギーが高い場合には主として制動輻射によってエネルギーを失うが、エネルギーの低下と共に自由電子との散乱や原子の励起の割合が増加し最終的には熱の形で吸収される。陽電子の場合には、エネルギーが低くなると電子との対消滅により0.511 MeVの光子を2個放出して消滅する。

物質との相互作用ではないが、電子・陽電子の蓄積リングにおいてはシンクロトロン放射光も重要な放射線である。シンクロトロン放射光は、放射光施設にとっては重要な線源であるが、機器の損傷の主要な放射線でもある。

#### 1.2.1 考慮すべき放射線

ハドロン加速器の場合と同様にどの放射線が重要かは検討する問題により異なる。

1. 放射線遮蔽  
電子加速においても、遮蔽の厚さを決めるのは基本的に光核反応や光中間子生成反応に伴って発生する中性子である。ビームの進行方向での遮蔽においては、遮蔽の厚さにより制動輻射の寄与が大きくなる場合がある。
2. 陽電子強度  
高エネルギー電子を用いて陽電子を作ることがしばしば行われるが、この場合には、電磁カスケードの過程で生じる陽電子のエネルギー、空間分布が求める量となる。
3. 放射化  
電子加速器における機器や構造体の放射化は制動輻射により生成した光子の核反応により生じる。一般的に、ハドロン加速器に較べると同じパワー当たりでは、電子加速器施設の放射化の程度は二桁以上小さい。
4. 機器の損傷  
放射光は、エネルギーが低いので鉛などによる遮蔽は容易であるが、物質の表面で吸収されるために物質に当たった場合には機器の損傷につながるので注意が必要である。

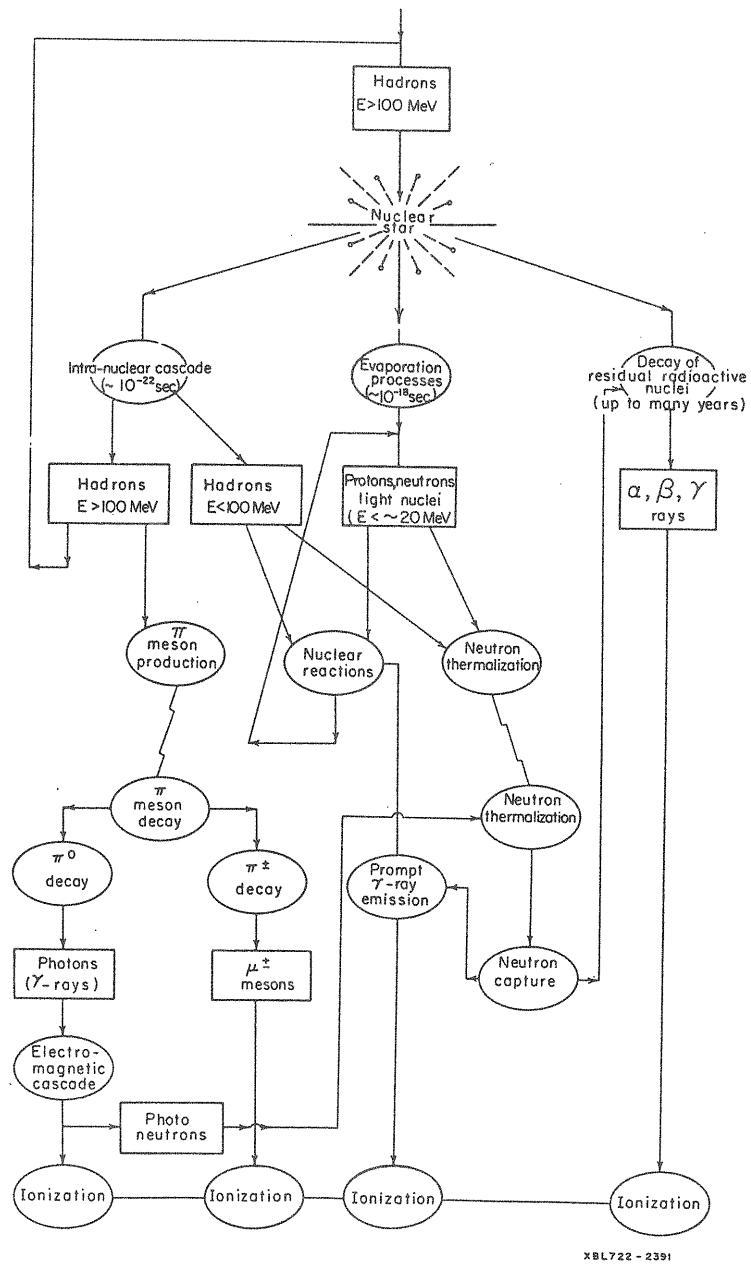


Fig. 1.1 Schematic representation of the development of the nuclear cascade.

Table 1.1 Classification of photon interactions

Type of Interaction Interaction with	ABSORPTION	SCATTERING	
		ELASTIC (Coherent)	INELASTIC (Incoherent)
	A	B	C
I ATOMIC ELECTRONS	<u>Photoelectric Effect</u> $\tau_{pe} \begin{cases} \sim Z^4 & (\text{low energy}) \\ \sim Z^5 & (\text{high energy}) \end{cases}$	<u>Rayleigh Scattering</u> $\sigma_R \sim Z^2$ (low energy limit)	<u>Compton Scattering</u> $\sigma \sim Z$
II NUCLEONS	<u>Photonuclear Reactions</u> $(\gamma, n), (\gamma, p), (\gamma, \beta), \text{ etc.}$ $\sigma_{pn} \sim Z$ $(h\nu \geq 10 \text{ MeV})$	Elastic Nuclear Scattering	Nuclear Resonance Scattering
III ELECTRIC FIELD OF SURROUNDING CHARGED PARTICLES	<u>Pair Production</u> a. <u>Field of Nucleus</u> $\kappa_n \sim Z^2 (h\nu \geq 1.02 \text{ MeV})$ b. <u>Field of Electron</u> $\kappa_e \sim Z (h\nu \geq 2.04 \text{ MeV})$	Delbruck Scattering	
IV MESONS	Photomeson Production $h\nu \geq 140 \text{ MeV}$		

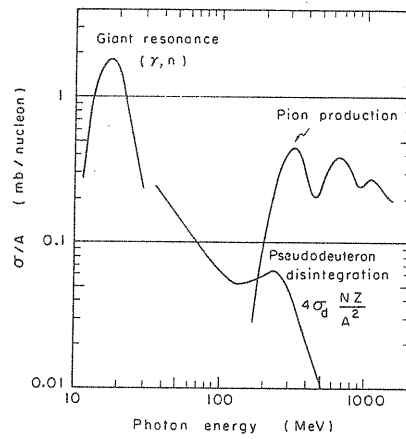


Fig. 1.2. Total photonuclear cross section per nucleon as a function of photon energy.

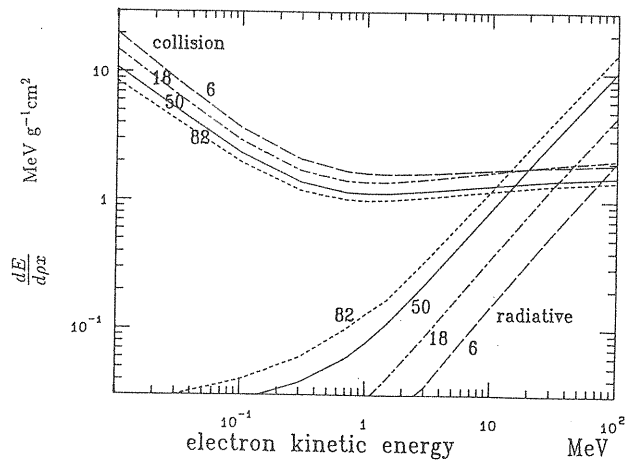


Fig. 1.3. Unrestricted collision and radiative mass stopping power versus energy for electrons in various materials.

## 2 ハドロンカスケード計算コード

ハドロンカスケードに関連する種々の物理量に関するデータは、電磁カスケードや低エネルギーの中性子等に比べて理論的にも実験的にも十分とは言えない。使用可能なデータを用いて、いくつかのモデルに基づきコードが作られている。

モデルは、大きく分けて「核カスケードモデル」と「粒子生成モデル」に分類できる。

### 2.1 核内カスケードモデルに基づくコードの系列

核内カスケードモデルは、1947年にSerberによって提唱され[1]、その後Goldberger[2]、Metropolis等によって具体的な計算がなされた。その成果は、DubnaのBarashenkovのグループ[4]、BNL/Columbiaのグループ[5]及びORNLのBertiniのグループ[6]によって計算コードとして展開された。

#### 2.1.1 HETC系列コードの開発

Bertini等によるMECC(Medium Energy Cascade Code)[for examples 7]を基に、HETC系列のコードがORNLで開発されてきた。

1. NTC -  $E_0 \leq 400$  MeV  
(~ early 1960's)
2. NMTC -  $E_0 \leq 3$  GeV  
(~ 1971)
3. HETC/RSIC -  $E_0$  above 3 GeV  
Version Incorporates  
(~1973) MECC-7, EVAP IV

NMTCコードは、その後BNL、JAERI(NMTC-JAERI[8])等で独自の改良がなされてきている。

HETCコードも、RSICバージョンをもとに様々な機関で改良が行われてきている。例えば、

1. HETC/ORNL Version  
- ORNL
2. HETC/SAI Version  
- SAI (Science Applications, Inc.)
3. HETC-KFA2  
- KFA as the parts of HERMES[9]
4. LAHET[10]  
- Los Alamos National Laboratory
5. HETC-3 STEP[11]  
- Japan MRI, JAERI, Kyushu Univ.

等がある。

一方、SSCプロジェクトの中でHETCをより高いエネルギー領域に適用する中で核内カスケードモデルの拡張では正しい結果を得ることが出来ない事が明らかになり、高エネルギーでの散乱モデル[12,13]を3 GeV以上のエネルギー領域に導入したHETC93がORNLからカロリメーター解析システムCALORシステム[14]の開発と関連して開発されている。

これらのコードでは、基本的に20MeV以下の中性子は、MCNP等の中性子・光子のモンテカルロコードと、電磁カスケードについてはEGS4等のモンテカルロコードに接続して計算するシステムになっている。

ロシアで開発されたコードは、ロシア以外で自由に使用できる状況にはないが、核内カスケードモデルに基づくコードとしてRTS&Tコード[15]がある。このコードでは、20MeVから25GeVのハドロンについては、Dubna versionの核内カスケード蒸発モデルを使用している。

核内カスケードモデルを用いる計算コードの特徴の一つとして、残留核を計算できるという事がある。高エネルギー陽子を用いた積分実験のほとんどが放射化法を使用している事、放射化断面積のデータが高エネルギーになるほど乏しいという事から、実験データとの直接の比較に使用することが可能である。しかし、一般的に統計が悪く、ターゲット内等限られたところ以外では適用が難しい。

#### 2.1.2 実測データとの比較及び利用例

NMTC, HETC系列のコードについては、pre-equilibrium processの導入により、中間エネルギー領域での精度が向上している。HETC-3STEPで求めた陽子からの中性子生成断面積について実測データとの比較を第2.1, 2.2図に示す。[16]

## 2.2 粒子生成モデルに基づくコード

核内カスケードモデルに基づくコードとは別に高エネルギー粒子生成モデルを用いた一連のモンテカルロコードがRanftとCERNの放射線グループによって1960年台から開発されてきた。[19]様々な名前のコード(TRANKA, KASPRO, MAGKA等)が作られたが、最終的にはFLUKAという名前のコードとして発展してきた。最初のFLUKA[20]は、50 MeV以上の粒子しか扱う事ができなかった。FLUKA-87のリリース前にA. Ferrari等のグループが加わり低エネルギー領域への拡張を初めとしたコードの大幅な改良が始まり、現在も続いている。高エネルギー領域の粒子生成モデルは、80年代に、Dual Parton Modelが組み込まれていたが、中間エネルギー領域への拡張は、PEANUT(PreEquilibrium Approach to Nuclear Thermalization)[21]の組み込みにより実現している。(第2.3図参照) 現在FLUKA[22]は、電磁カスケードや低エネルギー中性子を含めて、一つのコードで全てを扱う事が出来るようになってきているが、ユーザ容易に使える状況にはなっていない。

## 2.3 MARS, CASIM

上記のモンテカルロコードは、基本的に発生する2次粒子を全て追跡するという意味でアナログモンテカルロコードである。そのため、一般的に多くの計算時間が必要である。一方、平均的なハドロンカスケードの発達を知るには、Leading Particle Biasing などの手法が使える。この様なコードには、CASIM[23] やMARS[24]<sup>2</sup>がある。CASIMは高エネルギー粒子を主な対象とし、粒子生成については、Hagedon-Ranft (HR) モデル[25]に補正を加えて使用している。MARSは、hadron-nucleus 相互作用について、5GeV以上では半理論式を、5GeV以下では、Sychev等の式[26]を使用している。20MeV以下の中性子について、多群扱いでの計算が出来るようになってきているが、MCNP等に接続する事も試みられている。

## 2.4 QMD

QMD(Quantum Molecular Dynamics)[27]は、Gauss波束で表される核子の運動を扱う半古典的なシミュレーションであり、核物理において原子核-原子核反応を記述するモデルとして発展してきたである。新田等はQMDを核子-原子核に応用し、統計崩壊モデル(SDM; Statistical Decay Model)を加えて、陽子の核反応断面積に関する実験値を精度良く再現する事に成功している。[28] (第2.4図参照)核内カスケードの代わりにQMDを用いる試みもされているが、計算時間の関係で実用段階にはなっていない。

## 2.5 GEANT

上記のコードとは、全く別に高エネルギー物理の分野ではGEANT[30]が主に使用されてきた。GEANTは、主として複雑な形状の検出器を効率よく扱うトラッキングのコードで、ハドロンカスケードの部分は、GHEISHA[31]が使用されてきた。GEANTは、別のカスケードコードを組み込むことが可能で、SSCにおいて速及び低エネルギー中性子の扱いが不可欠になってからは、GEANT-CALOR, GEANT-FLUKA等の計算が行われている。GEANTについては、高エネルギー分野で精力的に改良が取り組まれており、現在はObject-Orientedなプログラムにしていくプロジェクトが進行中である。

---

<sup>2</sup>MARSの詳細については、9月2日に中尾氏が講義を行う。

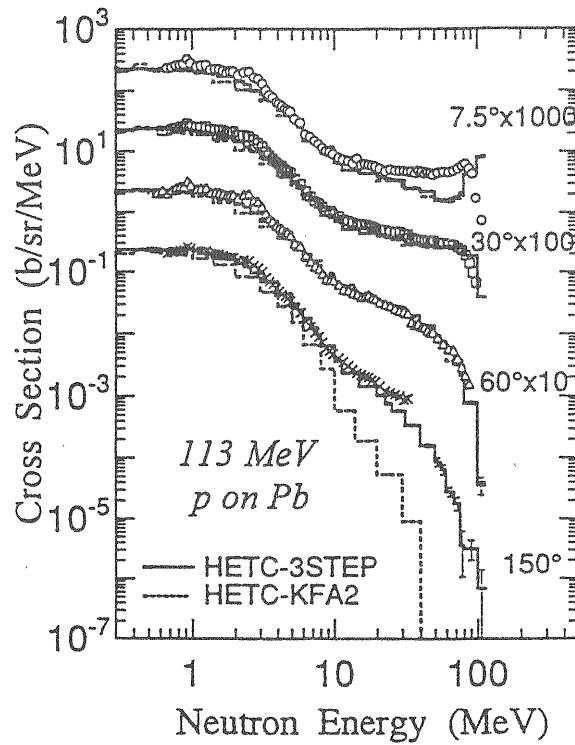


Fig.2.1 Double differential cross section for 113 MeV proton incident on lead. The symbols show the experimental data[17]. The solid and dashed lines indicate the three- and two-step calculations, respectively.

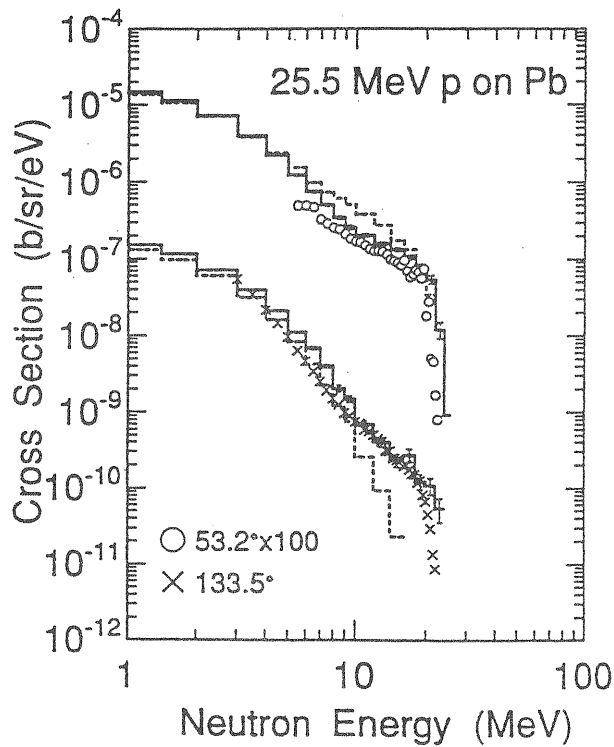


Fig.2.2 Double differential cross section for 25.5 MeV proton incident on lead. The symbols show the experimental data[18]. The solid and dashed lines indicate the three- and two-step calculations, respectively.

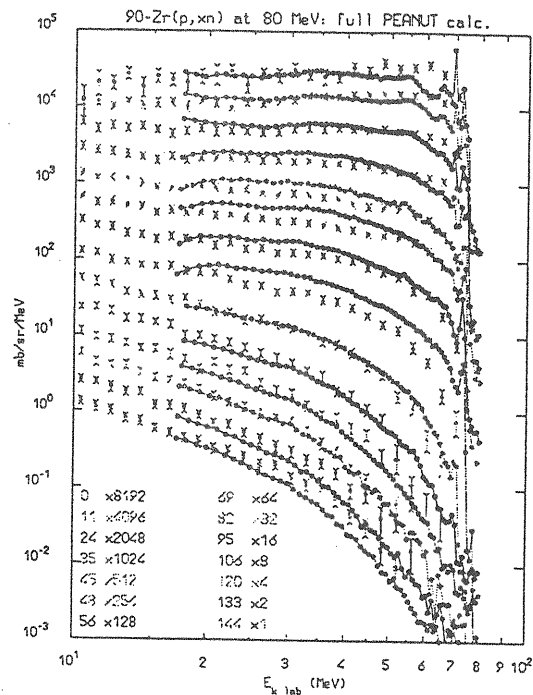


Fig.2.3  $^{90}\text{Zr}(p,xn)$  at 80 MeV, full PEANUT calculation.

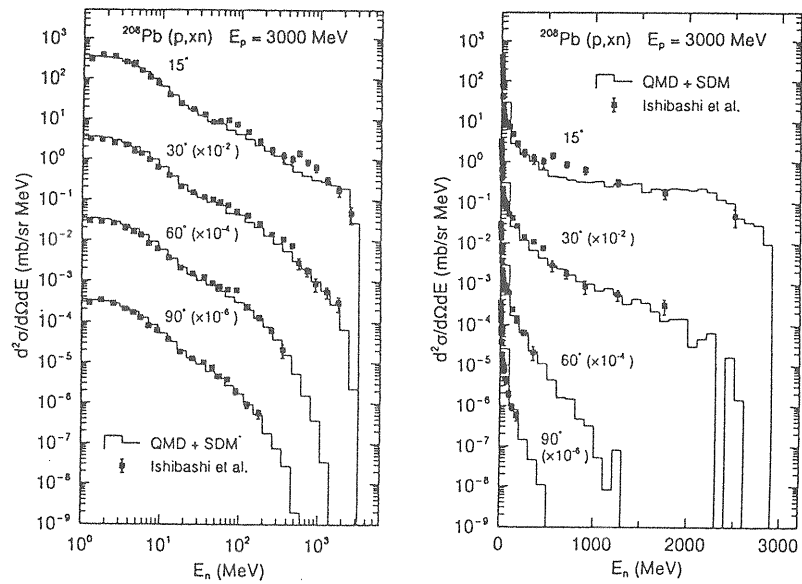


Fig.2.4 Neutron energy spectra for the reaction  $p(3\text{ GeV}) + ^{208}\text{Pb}$  at different laboratory angles as indicated in the figure. The x axis is plotted in a logarithmic scale on the left-hand side, and a linear scale on the right-hand side. The solid histograms are the results of QMD + SDM and symbols with error bars denote the experimental data taken from Ref.[29].

### 3 電磁カスケードモンテカルロ計算コード

コード作成者の周辺でのみ使用されているコードは別として、汎用の電磁カスケードモンテカルロコードは、“ETRAN”の系列のコードと“EGS”系列のコードに大別できる。

#### 3.1 ETRAN 系統のコード

##### 3.1.1 ETRAN

ETRAN(for Electron TRANsport)は、1963年に National Bureau of Standards(NBS)の Berger と Seltzer によって作られたモンテカルロコードである。ETRANにおける電子輸送の基本的な手法は、1963年の Berger の論文に基づいている。[32] その名前に示されているように、もともとは、数MeVまでの電子の輸送問題を解く目的で開発されてきたものである。そのため、低エネルギーの電子の輸送をできるだけ厳密に扱えるよう、多重散乱として Goudsmit-Saunderson の多重散乱分布 [33] を用いている。

その後、高エネルギー領域へ拡張するために制動輻射の発生や輸送がつけ加えられた。これは、後で紹介する EGS が、高エネルギー分野での使用を目的として作られ、その後低エネルギー領域へ拡張してきたのと全く逆の方向である。

ETRANモデルと呼ばれている ETRAN で用いられている algorithm は、Sandia National Laboratory の SANDYL, TIGER, CYLTRAN あるいは、ACCEPT といったコードの基礎となっている。

##### 3.1.2 ITS

ITS(Integrated Tiger Series)[34] は、Sandia National Laboratory で ETRAN モデルに基づき開発された Tiger シリーズを統合したシステムである。ITSに含まれたコードは 3.1 表に示されている。

Standard code が、物質中の元素の内最も原子番号の大きい元素の K-shell fluorescence や Auger 過程のみを扱うのに対して、P Code では、低エネルギーにおいてより詳細なモデルを適用している。一方、M Code では、マクロな電場や磁場中での輸送を扱う事ができる。

##### 3.1.3 MCNP

MCNP[35] は、当初は電子の輸送を含んでいなかったが、MCNP-4Aにおいて ITS Version 1 を組み込むことにより、電磁カスケードが扱える様になった。MCNP-4Bにおいては、ITS Version 3 を組み込むと共に、部分的に ITS と違った独自の扱いを行っている。しかしながら、例えば、水中のエネルギー吸収の分布においては、ITS をそのままのモードで使用

する MCNP-4B(ITS) が実測値や EGS4 等とよく一致するのに対して、default の MCNP-4B は合わないという結果も報告されている。[36]

MCNPにおける電磁カスケードの扱いは、基本的に ITS と同じである。

#### 3.2 EGS 系列のコード

##### 3.2.1 EGS4

1960年代に公開されていた電磁カスケードを扱う唯一のコードであった Nagel のコードが SLAC, DESY, MIT に導入され改良されてきた。この内、SLAC 及び Stanford において行われた改良が EGS (Electron Gamma Shower) へと発展していった。EGS system の開発の歴史を 3.2 表に示す。

EGS システムは、EGS3 の段階でマニュアル (SLAC-210) が整備され、 $e^+e^-$  衝突型の加速器が大成功を納めた時期と重なった事もあり、高エネルギー物理分野で広く使用されるようになり、高エネルギー物理分野での標準的なコードとなった。医学物理分野をはじめとする、低エネルギー領域でのユーザが増えると共に、低エネルギー領域への拡張が要望され、現在のバージョン EGS4<sup>3</sup>へと発展してきた。

##### 3.2.2 FLUKA, GEANT etc.

ハドロンカスケードを扱うモンテカルロコードである GEANT 及び FLUKA は、当初は EGS3 あるいは EGS4 をそれぞれの電磁カスケードを扱う部分に取り込んで使用していたが、その後独自の取り扱いをするようになっていく。[22,30]

## 4 低エネルギーの中性子-光子モンテカルロコード

陽子(重イオンを含む)加速器でも電子加速器でも、発生した中性子の多くは最終的には熱中性子となり、吸収され捕獲 $\gamma$ 線を放出する。従って、加速器施設における放射線を評価では、これら低エネルギーの中性子や光子も重要である。この領域の中性子や光子については、原子炉周辺のエネルギー領域であることから計算、実験の両面で高エネルギー領域に比べると桁違いに多くの研究がなされ発展してきた。低エネルギー(20MeV以下)の中性子及び光子の計算を行うモンテカルロ計算コードについても各国で様々なコードが開発されてきた。これらのコードにおいて計算時間の点で熱中性子の扱いが課題であったが、70年代後半に米国オークリッジ国立研究所において、断面積データを群構造にして扱う多群モンテカルロ

<sup>3</sup>EGS4の詳細については、9月1日に波戸氏が講義する。



計算コード MORSE[39] が開発され、様々な分野で利用された。

計算時間の点では、多群モンテカルロコードは有用であるが、群構造の断面積データを用いる事の問題点も明らかになり、計算機の性能の大幅な向上と共に、再び群構造ではなく、各エネルギー点における断面積データを用いるコードが使われる様になった。現在最も広く使用されているのは、電子カスケードモンテカルロ計算コードでも紹介した米国ロスアラモス国立研究所で開発された MCNP<sup>4</sup> である。

MCNP は、公開後も引き続き改良が行われており、新しいバージョンが公開されている。限られたエネルギー領域までではあるが、高エネルギー領域までを扱う MCNPX[40] というコード開発も進められている。

## 参考文献

- [1] R. Serber, *Phys. Rev.* **72**, 1114(1947).
- [2] M. L. Goldberger, *Phys. Rev.* **74**, 1268(1948).
- [3] N. Metropolis, R. Bivins, M. Storm, A. Turkevich, J. Miller, and G. Friedlander, *Phys. Rev.* **110**, 185(1958).
- [4] V. S. Barashenkov and V. D. Tonejev, *Vzaimodeystviya Vysokoenergeticheskikh Chastis i Atomnykh Yader 5 Yadrami, Moscow*(1972).
- [5] K. Chen, Z. Fraenkel, G. Friedlander, J. R. Grouer, J. M. Miller, and Y. Shimamoto, *Phys. Rev.* **166**, 949(1969).
- [6] Hugo W. Bertini, *Phys. Rev.* **188**, 1711(1969).
- [7] H. W. Bertini, M. P. Guthrie, and O. W. Hermann, "Instructions for the Operation of Codes Associated with MECC-3, A Preliminary Version of an Intranuclear-Cascade for Nuclear Reactiona," *ORNL-4564* (May 1971)
- [8] Y. Nakahara and T. Tsutsui, "NMTC/JAERI A Code System for High Energy Nuclear Reactions and Nuclear-Meson Transport Code," *JAERI-M 82-198*,(1982).
- [9] P. Cloth et al., "HERMES, A Monte Carlo Program System for Beam-Material Interaction Studies," *Jül-2203*, Kernforschungsanlage Jülich GmbH(1988).
- [10] R. E. Prael and H. Lichtenstein, "User Guide to LCS: The LAHET Code System," Los Alamos National Lab, *UR-89-3014*, September 1989.
- [11] N. Yoshizawa et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **32**, 601(1995).
- [12] P. A. Capella and J. Tran Thanh Van, *Phys. Letts.* **93B**, 2(1980).
- [13] P. A. Aarnio et al., CERN TIS Divisional Report, *TIS-RP/106-Rev*(1984).
- [14] T. A. Gabriel, "Codes, Models, and Cross Sections for Use in Analyzing Compensated Calorimeters," *Proceedings of Workshop on Compensated Calorimetry CALT-68-1305*, Pasadena (1985).
- [15] A. I. Blokhin et al., "RTS&T Monte Carlo Code (Facilities and Computation Methods), Proceedings of the Third Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments (SARE3), KEK, Tsukuba May 7-9, 1997, KEK proceedings 97-5, pp52-62.
- [16] N. Yoshizawa, H. Takada and K. Ishibashi, "Development of the High-Energy Transport Code HETC-3STEP -Inclusive of an Exciton Model into HETC-", Proceedings of SARE2, October 9-11, 1995, CERN, pp126-131.
- [17] M. M. Meier et al., *Nucl. Sci. Eng.* **102**, 310(1989).
- [18] K. Harder et al., *Hamburg University HH-87-01*(1987).
- [19] J. Ranft, "33 Years of High Energy Radiation Monte Carlo Calculations in Europe as seen from CERN," in Proceedings SARE2 *CERN/TIS-RP/97-05* (1997).
- [20] J. Ranft and J. T. Routti, "Monte Carlo programs for calculating three-dimensional high-energy (50 MeV - 500 GeV) Hadron cascade in matter," *Comp. Phys. Commun.* **7**, 27-342(1974).
- [21] A. Ferrari and P. R. Sala, "A New Model for Hadronic Interactions at Intermediate Energies for the FLUKA Code," in Proceedings MC93, 277-288(1993).
- [22] P. A. Aarnio et al., "Electron-Photon Transport: Always so good as we think? Experience with FLUKA", Proc. Int. Conf. on Monte Carlo Simulation in High Energy and Nuclear Physics, Thallahasse, Florida, USA, 22-26 February 1993, pp.111-128.
- [23] A. Van Ginnekin, "CASIM, Program to Simulate Hardronic Cascades in Bulk Matter," Fermilab, *FN-272* (1975).

<sup>4</sup>MCNP の詳細については、9月3日に大橋氏が講演する。

- [24] N. V. Mokov, "The MARS Code System Users Guide, version 13(95)," Fermilab, *FN-628*(1995).
- [25] R. Hagedon and J. Ranft, *Suppl. Novo Cim.* **6**, 169(1968) etc.
- [26] B. S. Sychev, A. Ya. Serov and B. V. Man'ko, *MRTI-799*, Moscow(1979).
- [27] J. Aichelin, *Phys. Rep.* **202**, 233(1991).
- [28] K. Niita, S. Chiba, H. Takada, T. Maruyama, "Hadron Transport Simulation Based on the Quantum Molecular Dynamics", Proceedings of SARE3, *KEK Proceedings 97-5*, June 1997.
- [29] K. Ishibashi et al., *J. Nucl. Sci. Technol.* **32**, 827(1995).
- [30] R. Burn et al., "GEANT3", CERN *DD/EE/84-1*(1984).
- [31] H. Fesefeldt, "The Simulation of Hadronic Shower-Physics and Applications," RWTH Aachen *PITHA 85/02* (1985).
- [32] M. J. Berger, "Monte Carlo Calculation of Penetration and Diffusion of Fast Charged Particles", in *Methods in Computational Physics, Vol. 1*, edited by B. Alder, S. Fernbach and M. Rotenberg. (Academic Press. New York, 1963)135.
- [33] S. Goudsmit and J. L. Saunderson, "Multiple Scattering of Electrons", *Phys. Rev.* **57**(1940)24.
- [34] J. A. Halbleib and T. A. Mehlhorn "ITS: The Integrated TIGER Series of Coupled Electron/Photon Monte Carlo Transport Codes", *Nucl. Sci. Eng.* **92**(1986)338.
- [35] J. F. Briesmeister, Editor, "MCNP<sup>TM</sup> - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code", *Los Alamos National Laboratory Report LA-12625-M* (November, 1993).
- [36] R. Jeraj, P. Keall, P. Ostwald, "Comparison among MCNP, EGS4 and SMC on electron backscattering", World Congress on Medical Physics and Bioengineering, I 76-OS2-4, Nice, September(1997).
- [37] R. Ford and W. R. Nelson, "The EGS Code System: Computer Programmes for the Monte Carlo Simulation of Electromagnetic Cascade Showers (Version 3)", Stanford Linear Accelerator Center report *SLAC-265*(1985).
- [38] E. R. Nelson, H. Hirayama and D. W. O. Rogers, "The EGS4 Code System", Stanford Linear Accelerator Center report *SLAC-265* (1985).
- [39] M. B. Emmeth, "The MORSE Monte Carlo Radiation Transport Code System", *ORNL-4972*, Orak Ridge National Laboratory (1975).
- [40] H. G. Hughes, R. E. Prael, and R. C. Little, "MCNPX - The LAHET/MCNP Code Merger", *Technical Report XTM-RU (U) 97-012*, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, April, 1997.

Table 3.1 ITS Member Codes

Standard Codes	Dimension	Enhanced Ionization/Relaxation (P Codes)	Macroscopic Fields (M Codes)
TIGER	1-D	TIGERP	
CYLTRAN	2-D	CYLTRANP	CYLTRANM
ACCEPT	3-D	ACCEPTP	ACCEPTM

Table 3.2 History of EGS System

Period	Programme	Language	Authors
1963~1965	SHOWER1	FORTRAN	Nagel
1966	SHOWER2	FORTRAN	Nicoli
1967~1972	SHOWER3/PREPRO (PREPRO -- >pre-processing)	FORTRAN	Ryder, Talwar and Nelson
1970~1972	SHOWER4/SHINP (SHINP -- >Shower input)	FORTRAN	Ford
1974	EGS1/PEGS1 (PEGS -- >Processor for EGS)	FORTRAN	Ford and Nelson
1975	EGS2/PEGS2	MORTRAN2	Ford and Nelson
1976~1977	EGS3/PEGS3 (SLAC-210)[37]	MORTRAN2	Ford and Nelson
1982~1985	EGS4/PEGS4 (SLAC-265)[38]	MORTRAN3	Nelson, Hirayama and Rogers