Generátor PYTHIA/JETSET

Účel: modelovanie vysokoenergetických zrážok častíc

Fyzikálne aspekty v časovej evolúcii zrážky:

1. Počiatočný stav: dve častice vstupujúce do interakcie. Každá z nich je charakterizovaná náborom štruktúrnych funkcií (rozdelenia partónov –kvarkov , gluónov).

2. Interakcia: častice interagujú prostredníctvom partónov – 2 partóny vstupujúce do interakcie (po jednom z každej častice) iniciujú (vo všeobecnosti) kaskádne vetvenie $q \rightarrow q\,g$ (initial state showers).

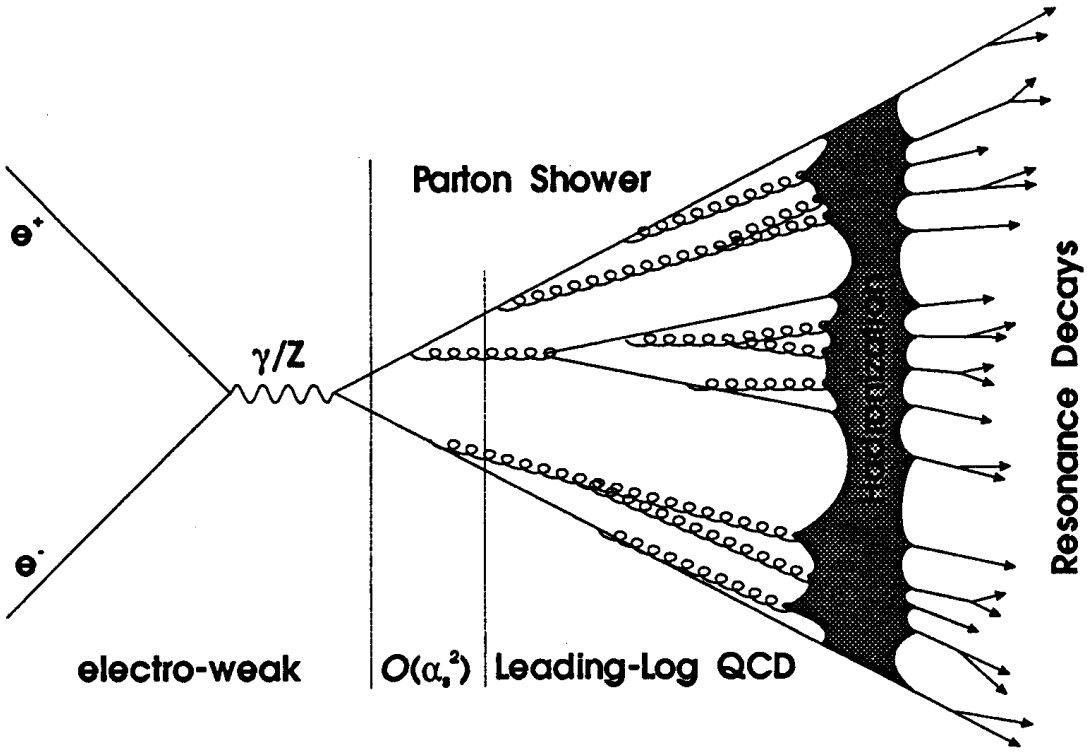
3. V každej z dvoch počiatočných spŕšok je po jednom partóne z každej častice, ktoré vstupujú do nepružného (hard) procesu.

4. Výstupné partóny môžu vytvárať spŕšky (final state showers).

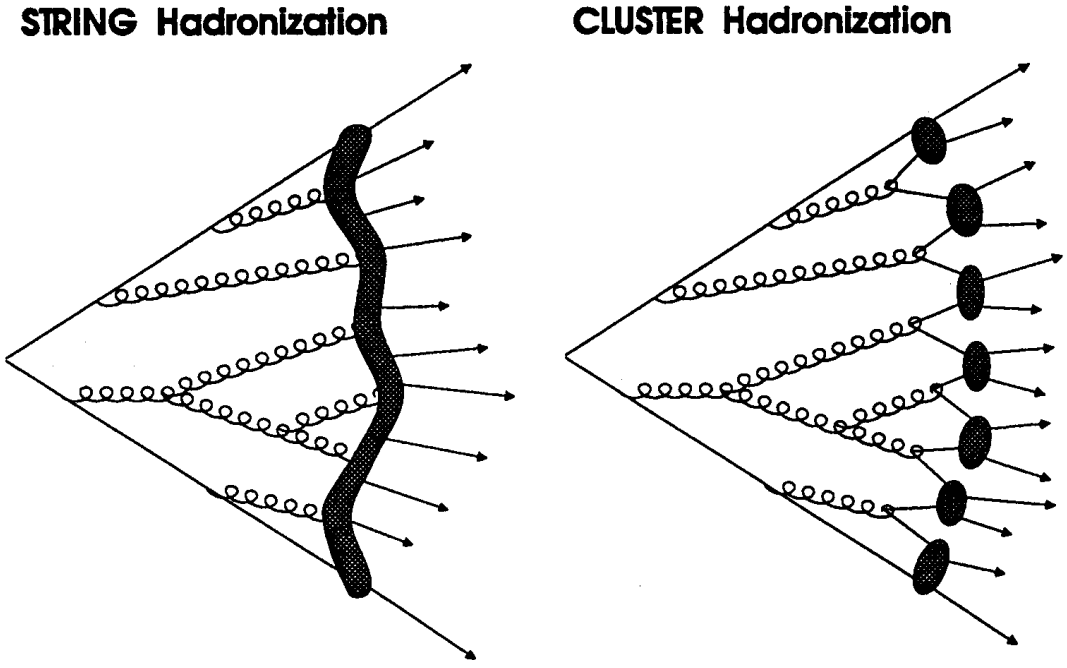
5. Po východe partónového iniciátora spŕšky zostatok častice má farebný náboj, ktorým je viazaný k zvyšku finálneho stavu .

6. QCD-mechanizmus uväznenia zabezpečuje, že výstupné kvarky a gluóny nebudú pozorovateľné $\rightarrow$ fragmentácia na hadróny (hadronizácia).

7. Mnohé z produkovaných hadrónov sú nestabilné a rozpadajú sa.



Obr. 1: Schematické zobrazenie interakcie ($e^+ e^-$) so vznikom partónových spŕšiek



Obr. 2: Grafické zobrazenie strunovej a klasterovej hadronizácie.

Nepružné (hard) procesy

PYTHIA/JETSET poskytujú rôzne typy nepružných procesov:

- „Hard“ QCD-procesy $qg \to qg$.
- „Soft“ QCD-procesy (difraktívny a elastický rozptyl, procesy s malou prenesenou hybnosťou)
- produkcia ťažkých kvarkov, napr.: $gg \to tt$
- hlboko-nepružný rozptyl - $ql \to ql$
- produkcia Higgsovho bozónu (v rámci SM)
- produkcia častíc za SM, etc.

Účinný prierez pre proces $ij \to k$:

$$\sigma_{ij\to k} = \int dx_1 \int dx_2 \cdot f_i^1(x_1, Q^2) \cdot f_j^2(x_1, Q^2) \cdot \hat{\sigma}_{ij\to k}$$

kde

x_1, x_2 sú Bjorkenove premenné

Q^2 – odovzdaná hybnosť v partónovom procese

$f_i^{1(2)}$ – štruktúrne funkcie

$\hat{\sigma}_{ij\to k}$ účinný prierez daný maticovým elementom

Radiačné procesy v počiatočnom a konečnom stave

Ak proces obsahuje nabitý a/alebo farebný objekt ⇒ je možnosť vyžiarenia fotónu resp. gluónu.

PYTHIA obsahuje 2 prístupy:

- maticový via Feynmannove diagramy (ťažkosti pri výpočte vyšších rádov, problém vyžarovania mäkkých gluónov).
- Partónová sprška (fenomenologický prístup)

Oba prístupy sú komplementárne a môžu sa doplňovať.

Časticové zostatky

Zostatky po „výlete“ iniciátoroch partónovej zrážky sú farebné – preto sú spojené s produktom partónovej interakcie a vytvárajú časť fragmentačného systému (v prípade protónu s interagujúcim u-kvarkom zostávajúci dikvark ud je farebný anti-triplet)

Fragmentácia (hadronizácia)

QCD-poruchová teória je platná na malých vzdialenostiach. Na veľkých vzdialenostiach väzbová konštanta silných interakcií je veľká ⇒ začína režim konfajnmentu: farebné partóny prechádzajú v bezfarebné hadróny.

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{12\pi}{33 - 2n_f \ln\left(Q^2/\Lambda^2\right)}$$

α_s ≡ väzbová konštanta silných interakcií
n ≡ počet typov kvarkov,
Λ ≡ QCD−konštanta (≈ 200 − 300 MeV)

Fragmentácia sa realizuje na báze fenomenologického prístupu:

- Strunová fragmentácia
- Nezávislá fragmentácia
- Klasterová fragmentácia

Getting Started with PYTHIA

1. ***The initialization step***. It is here that all the basic characteristics of the coming generation are specified. The material in this section includes the following.
   - Common blocks, at least the following, and maybe some more:

```
COMMON /LUJETS/ N,K (4000,5) ,P (4000,5) ,V(4000,5)
COMMON /LUDAT1/ MSTU(200) ,PARU(200) ,MSTJ(200) ,PARJ(200)
COMMON /PYSUBS/ MSEL,MSUB(200) ,KFIN(2,-40:40) ,CKIN(200)
COMMON /PYPARS/ MSTP(200) ,PARP(200) ,MSTI(200) ,PARI(200)
```

   - ***Selection of required processes***. Some fixed 'menus' of subprocesses can I selected with different ***MSEL*** values, but with ***MSEL=0*** it is possible to compose 'a la carte', using the subprocess numbers. To generate processes ***14***, ***18*** and ***29***, for instance, one needs

```
MSEL=0
MSUB(14)=1
MSUB(18)=1
MSUB(29)=1
```

   - ***Selection of kinematics cuts in the CKIN array***. To generate hard scattering with 5 $GeV < p_\perp <$ 10 GeV, for instance, use

```
CKIN(3)=5.
CKIN(4)=10.
```

     Unfortunately, initial- and final-state radiation will shift around the kinematics of the hard scattering, making the effects of cuts less predictable. One therefore always has to be very careful that no desired event configurations are cut out.

   - Definition of underlying physics scenario, e.g. top mass.

   - Selection of structure function sets, Q^2 definitions, and all other details of the generation.

   - Switching off of generator parts not needed for toy simulations, e.g. fragmentation for parton level studies.

   - Initialization of the event generation procedure. Here kinematics is set up, maxima of differential cross-sections are found for future Monte Carlo generation, and a number of other preparatory tasks carried out. Initialization is performed by PYINIT, which should be called only after the switches and parameters above have been set to their desired values. The frame, the beam particles and the energy have to be specified.

CALL PYINIT('CMS' ,'p','pbar' ,1800.)

Any other initial material required by the user, e.g. histogram booking.

2. ***The generation loop***.

It is here that events are generated and studied. It includes the following tasks:

- Generation of the next event, with

CALL PYEVNT

- Printing of a few events, to check that everything is working as planned, with

CALL LULIST(1)

- An analysis of the event for properties of interest, either directly reading out information from the LUJETS common block or making use of a number of utility routines in JETSET.

- Saving of events on tape, or interfacing to detector simulation.

3. ***The finishing step.***

Here the tasks are:

- Printing a table of deduced cross-sections, obtained as a by-product of the Monte Carlo generation activity, with the command

CALL PYSTAT(1)

- Printing histograms and other user output.

Example

To illustrate this structure, imagine a toy example, where one wants to simulate the production of a 300 GeV Higgs particle.

The basic processes:

$$gg \rightarrow H$$

$$ZZ \rightarrow H$$

$$WW \rightarrow H$$

Top mass is m_{top}= *173.8 GeV*

PYTHIA: príklad možného programu.

```
C. . . Common blocks.
      COMMON/LUJETS/ N,K(4000,5),P(4000,5),V(4000,5)
      COMMON/LUDAT1/ MSTU(200),PARU(200) ,MSTJ(200) ,PARJ(200)
      COMMON/LUDAT2/ KCHG(500,3) ,PMAS(500,4),PARF(2000) ,VCKM(4,4)
      COMMON/LUDAT3/ MDCY(500,3) ,MDME(2000,2) ,BRAT(2000) ,KFDP(2000,5)
      COMMON/PYSUBS/ MSEL, MSUB(200) , KFIN (2, -40:40) , CKIN (200)
      COMMOM/PYPARS/ MSTP (200), PARP (200), MSTI (200), PARI (200)
      COMMON/PAWC/ HBOOK(10000)

C... Number of events to generate. Switch on proper processes.
      NEV=1000
      MSEL=0
      MSUB(102)=1          ! gg    → H
      MSUB(123)=1          ! ZZ fussion
      MSUB(124)=1          ! WW fussion

C.. .Select top and H masses and kinematics cuts in mass.
      PMAS(6,1)  =173.8.
      PMAS(25,1)=300.
      CKIN(1)=290.
      CKIN(2)=310.
C...For simulation of hard process only: cut out unnecessary tasks.
      MSTP(61)=0
      MSTP(71)=0
      MSTP(81)=0
      MSTP(111)=0
C... Initialize and list partial widths.
      CALL PYINIT('CMS','p','p' ,16000.)
      CALL PYSTAT(2)
C. . . Book histograms.
      CALL HLIMIT (10000)
      CALL HBOOK1(10,'Higgs mass' ,50,275. ,325. ,0.)

C. ..Generate events. Look at first few.
      DO  IEV=1,NEV
         CALL PYEVNT
         IF(IEV.LE.2) CALL LULIST(1)
C.. -    Loop over particles to find Higgs and histogram its mass.
         DO  i=1,N
            IF(K(i,2).EQ.25) HMASS=P(i,5)
         ENDDO
        CALL HFI(10,HMASS,1.)
      ENDDO
C... Print cross-sections and histograms.
      CALL PYSTAT(1)
      CALL HISTDO
      END
```

Comment to the code.

Here 102, 123 and 124 are the three main Higgs production graphs $gg \to H$, $ZZ \to H$, and $WW \to H$, and MSUB(ISUB)=1 is the command to switch on process ISUB. Full freedom to combine subprocesses 'a la carte' is ensured by MSEL=0; ready-made 'menus' can be ordered with other MSEL numbers. The PMAS commands set the masses of the top quark and the Higgs itself, and the CKIN variables the desired mass range of the Higgs a Higgs with a 300 GeV nominal mass actually has a fairly broad Breit-Wigner type mass distribution. The MSTP switches that come next are there to modify the generation procedure, in this case to switch off initial- and final-state radiation, multiple interactions among beam jets, and fragmentation, to give only the 'parton skeleton' of the hard process. The PYINIT call initializes PYTHIA, by finding maxima of cross-sections, recalculating the Higgs decay properties (which depend on the Higgs mass), etc. The decay properties can be listed with PYSTAT(2).

Inside the event loop, PYEVNT is called to generate an event, and LULIST(1) to list the event. The information used by LULIST(1) is the event record, stored in the common block LUJETS. Here one finds all produced particles, both final and intermediate ones, with information on particle species and event history (K array), particle momenta (P array) and production vertices (V array). In the loop over all particles produced, I through N, the Higgs particle is found by its code, K(l,2)=25, and its mass is stored in P(l,5). After all events have been generated, PYSTAT(1) gives a summary of the number of events generated in the various allowed channels, and the inferred cross-sections.

In the run above, a typical event listing might look like the following.

The Event Record

The event record is the central repository for information about the particles produced in the current event: flavours, momenta, event history, and production vertices. It plays a very central role: without a proper understanding of what the record is and how information is stored, it is meaningless to try to use either JETSET or PYTHIA. The record is stored in the common block LUJETS. Almost all the routines that the user calls can be viewed as performing some action on the record: fill a new event, let partons fragment or particles decay, boost it, list it, find clusters, etc.

In this section we will first describe the KF flavour code, subsequently the LUJETS common block, and then give a few comments about the role of the event record in the programs.

Kódy častíc

Table 1: **Kódy kvarkov a leptónov.**

KF	Name	Printed	KF	Name	Printed
1	d	d	11	e^-	e-
2	u	u	12	ν_e	nu_e
3	s	s	13	μ^-	mu-
4	c	c	14	ν_μ	nu_mu
5	b	b	15	τ^-	tau-
6	t	t	16	ν_τ	nu_tau
7	l	l	17	χ^-	chi-
8	h	h	18	ν_χ	nu_chi
9			19		
10			20		

Table 2: **Kalibračné bozóny a iné fundamentálne bozóny**.

KF	Name	Printed	KF	Name	Printed
21	g	g	31		
22	γ	gamma	32	Z'^0	Z'0
23	Z^0	Z0	33	Z''^0	Z"0
24	W^+	W+	34	W'^+	W'+
25	H^0	H0	35	H'^0	H'0
26			36	A^0	A0
27			37	H^+	H+
28			38	η_{techni}	eta_tech0
29			39	L_Q	LQ
30			40	R^0	R0

Table 3: **Dikvarky.** *KF= 1000*i + 100*j + 2s+1*

KF	Name	Printed	KF	Name	Printed
			1103	dd_1	dd_1
2101	ud_0	ud_0	2103	ud_1	ud_1
			2203	uu_1	uu_1
3101	sd_0	sd_0	3103	sd_1	sd_1
3201	su_0	su_0	3203	su_1	su_1
			3303	ss_1	ss_1

Kde ***i, j*** sú kódy kvarkov a ***s*** je spin dikvarku.

Tabuľky kódov častíc (mezóny a baryóny)

Table 7: Meson codes, part 1.

KF	Name	Printed	KF	Name	Printed
211	π^+	pi+	213	ρ^+	rho+
311	K^0	K0	313	K^{*0}	K*0
321	K^+	K+	323	K^{*+}	K*+
411	D^+	D+	413	D^{*+}	D*+
421	D^0	D0	423	D^{*0}	D*0
431	D_s^+	D_s+	433	D_s^{*+}	D*_s+
511	B^0	B0	513	B^{*0}	B*0
521	B^+	B+	523	B^{*+}	B*+
531	B_s^0	B_s0	533	B_s^{*0}	B*_s0
541	B_c^+	B_c+	543	B_c^{*+}	B*_c+
111	π^0	pi0	113	ρ^0	rho0
221	η	eta	223	ω	omega
331	η'	eta'	333	ϕ	phi
441	η_c	eta_c	443	J/ψ	J/psi
551	η_b	eta_b	553	Υ	Upsilon
661	η_t	eta_t	663	Θ	Theta
130	K_L^0	K_L0			
310	K_S^0	K_S0			

Table 8: Meson codes, part 2.

KF	Name	Printed	KF	Name	Printed
10213	b_1	b_1+	10211	a_0^+	a_0+
10313	K_1^0	K_10	10311	K_0^{*0}	K*_00
10323	K_1^+	K_1+	10321	K_0^{*+}	K*_0+
10413	D_1^+	D_1+	10411	D_0^{*+}	D*_0+
10423	D_1^0	D_10	10421	D_0^{*0}	D*_00
10433	D_{1s}^+	D_1s+	10431	D_{0s}^{*+}	D*_0s+
10113	b_1^0	b_10	10111	a_0^0	a_00
10223	h_1^0	h_10	10221	f_0^0	f_00
10333	$h_1'^0$	h'_10	10331	$f_0'^0$	f'_00
10443	h_{1c}^0	h_1c0	10441	χ_{0c}^0	chi_0c0
20213	a_1^+	a_1+	215	a_2^+	a_2+
20313	K_1^{*0}	K*_10	315	K_2^{*0}	K*_20
20323	K_1^{*+}	K*_1+	325	K_2^{*+}	K*_2+
20413	D_1^{*+}	D*_1+	415	D_2^{*+}	D*_2+
20423	D_1^{*0}	D*_10	425	D_2^{*0}	D*_20
20433	D_{1s}^{*+}	D*_1s+	435	D_{2s}^{*+}	D*_2s+
20113	a_1^0	a_10	115	a_2^0	a_20
20223	f_1^0	f_10	225	f_2^0	f_20
20333	$f_1'^0$	f'_10	335	$f_2'^0$	f'_20
20443	χ_{1c}^0	chi_1c0	445	χ_{2c}^0	chi_2c0
30443	ψ'	psi'			
30553	Υ'	Upsilon'			

Table 9: Baryon codes.

KF	Name	Printed	KF	Name	Printed
			1114	Δ^-	Delta-
2112	n	n0	2114	Δ^0	Delta0
2212	p	p+	2214	Δ^+	Delta+
			2224	Δ^{++}	Delta++
3112	Σ^-	Sigma-	3114	Σ^{*-}	Sigma*-
3122	Λ^0	Lambda0			
3212	Σ^0	Sigma0	3214	Σ^{*0}	Sigma*0
3222	Σ^+	Sigma+	3224	Σ^{*+}	Sigma*+
3312	Ξ^-	Xi-	3314	Ξ^{*-}	Xi*-
3322	Ξ^0	Xi0	3324	Ξ^{*0}	Xi*0
			3334	Ω^-	Omega-
4112	Σ_c^0	Sigma_c0	4114	Σ_c^{*0}	Sigma*_c0
4122	Λ_c^+	Lambda_c+			
4212	Σ_c^+	Sigma_c+	4214	Σ_c^{*+}	Sigma*_c+
4222	Σ_c^{++}	Sigma_c++	4224	Σ_c^{*++}	Sigma*_c++
4132	Ξ_c^0	Xi_c0			
4312	$\Xi_c'^0$	Xi'_c0	4314	Ξ_c^{*0}	Xi*_c0
4232	Ξ_c^+	Xi_c+			
4322	$\Xi_c'^+$	Xi'_c+	4324	Ξ_c^{*+}	Xi*_c+
4332	Ω_c^0	Omega_c0	4334	Ω_c^{*0}	Omega*_c0
5112	Σ_b^-	Sigma_b-	5114	Σ_b^{*-}	Sigma*_b-
5122	Λ_b^0	Lambda_b0			
5212	Σ_b^0	Sigma_b0	5214	Σ_b^{*0}	Sigma*_b0
5222	Σ_b^+	Sigma_b+	5224	Σ_b^{*+}	Sigma*_b+

Dikvarky.
*KF= 1000*i + 100*j + 2s+1*

Mezóny:

$$KF = \{100\max(i,j) + 10\min(i,j) + 2s + 1\} \times sign(i-j)(-1)^{\max(i,j)}$$

Baryóny:
*KF= 1000*i + 100*j + 10*k + 2s+1*

KF	Printed	Meaning
110	pi_diffr0	Diffractive $\pi^0/\rho^0/\gamma$ state
210	pi_diffr+	Diffractive π^+ state
2110	n_diffr	Diffractive n state
2210	p_diffr+	Diffractive p state

Častica je v ***PYTHIA/JETSET*** charakterizovaná ***4-hybnosťou***, ***hmotnosťou, súradnicami produkčného vertexu, časom produkcie*** a ďalšími charakteristikami udávajúcimi pôvod častice a pod.

Informácia o časticiach sa nachádza v common-bloku ***LUJETS.***

COMMON/LUJETS/ N, K(4000,5) ,P (4000,5) ,V(4000,5)

N ≡ počet riadkov v maticiach *K,P,V* – prakticky je to počet častíc zúčastňujúcich sa interakcie.

K(i,1) ≡ status kód častice (partónu) obsiahnutého v *i*-tom riadku,

K(i,2) ≡ KF-kód častice (partónu),

K(i,3) ≡ číslo riadku rodičovskej častice (jetu),

K(i,4) ≡ číslo riadku číslo riadku prvého dcérskeho produktu, pre K(i,1)=3, 13, 14 udáva tok farby (z ktorého partónu na ktorý),

K(i,5) ≡ číslo riadku číslo riadku posledného dcérskeho produktu, pre K(i,1)=3, 13, 14 udáva tok farby.

P(i,1) ≡ p_x , *x*-zložka hybnosti v *GeV/c.*

P(i,2) ≡ p_y , *y*-zložka hybnosti v *GeV/c.*

P(i,3) ≡ p_z , *z*-zložka hybnosti v *GeV/c.*

P(i,4) ≡ E , energia v *GeV.*

P(i,5) ≡ m , hmotnosť v GeV/c^2, pre priestoru-podobné virtuálne častice =-Q (prenesená hybnosť).

V(i,1) ≡ *x* súradnica produkčného vertexu v *mm.*

V(i,2) ≡ *y* súradnica produkčného vertexu v *mm.*

V(i,3) ≡ *z* súradnica produkčného vertexu v *mm.*

V(i,4) ≡ t čas produkčného vertexu v *mm/c* ($\approx 3.33\times10^{-12}s$).

V(i,5) ≡ τ doba života častice v *mm/c* ($\approx 3.33\times10^{-12}s$).

Informáciu o produkovaných časticiach je možné získať pomocou:

CALL LULIST(Mlist)

Mlist ovláda bohatosť výstupného listingu.

Kódy procesov

Table 1: Kódy sub-procesov, *časť 1.*, + v 1. stĺpci znamená, že proces je implementovaný, 2. stĺpec udáva referenčné číslo subprocesu (ISUB).

In	No.	Subprocess	Reference
		a) $2 \to 1$, tree	
+	1	$f_i\bar{f}_i \to \gamma^*/Z^0$	[Eic84]
+	2	$f_i\bar{f}_j \to W^+$	[Eic84]
+	3	$f_i\bar{f}_i \to H^0$	[Eic84]
	4	$\gamma W^+ \to W^+$	
+	5	$Z^0Z^0 \to H^0$	[Eic84, Cha85]
	6	$Z^0W^+ \to W^+$	
	7	$W^+W^- \to Z^0$	
+	8	$W^+W^- \to H^0$	[Eic84, Cha85]
		b) $2 \to 2$, tree	
+	10	$f_if_j \to f_if_j$ (QFD)	[Ing87b]
+	11	$f_if_j \to f_if_j$ (QCD)	[Com77, Ben84, Eic84]
+	12	$f_i\bar{f}_i \to f_k\bar{f}_k$	[Com77, Ben84, Eic84]
+	13	$f_i\bar{f}_i \to gg$	[Com77, Ben84]
+	14	$f_i\bar{f}_i \to g\gamma$	[Hal78, Ben84]
+	15	$f_i\bar{f}_i \to gZ^0$	[Eic84]
+	16	$f_i\bar{f}_j \to gW^+$	[Eic84]
	17	$f_i\bar{f}_i \to gH^0$	
+	18	$f_i\bar{f}_i \to \gamma\gamma$	[Ber84]
+	19	$f_i\bar{f}_i \to \gamma Z^0$	[Eic84]
+	20	$f_i\bar{f}_j \to \gamma W^+$	[Eic84, Sam91]
	21	$f_i\bar{f}_i \to \gamma H^0$	
+	22	$f_i\bar{f}_i \to Z^0Z^0$	[Eic84, Gun86]
+	23	$f_i\bar{f}_j \to Z^0W^+$	[Eic84, Gun86]
+	24	$f_i\bar{f}_i \to Z^0H^0$	[Ber84]
+	25	$f_i\bar{f}_i \to W^+W^-$	[Eic84, Gun86]
+	26	$f_i\bar{f}_j \to W^+H^0$	[Eic84]
	27	$f_i\bar{f}_i \to H^0H^0$	
+	28	$f_ig \to f_ig$	[Com77, Ben84]
+	29	$f_ig \to f_i\gamma$	[Hal78, Ben84]
+	30	$f_ig \to f_iZ^0$	[Eic84]
+	31	$f_ig \to f_kW^+$	[Eic84]
	32	$f_ig \to f_iH^0$	
+	33	$f_i\gamma \to f_ig$	[Duk82]
+	34	$f_i\gamma \to f_i\gamma$	[Duk82]
+	35	$f_i\gamma \to f_iZ^0$	[Gab86]
+	36	$f_i\gamma \to f_kW^+$	[Gab86]
	37	$f_i\gamma \to f_iH^0$	
	38	$f_iZ^0 \to f_ig$	
	39	$f_iZ^0 \to f_i\gamma$	
	40	$f_iZ^0 \to f_iZ^0$	

Table 2: Kódy sub-procesov, *časť 2.*, + v 1. stĺpci znamená, že proces je implementovaný, 2. stĺpec udáva referenčné číslo subprocesu (ISUB).

In	No.	Subprocess	Reference
		b) $2 \to 2$, tree (cont'd)	
	41	$f_i Z^0 \to f_k W^+$	
	42	$f_i Z^0 \to f_i H^0$	
	43	$f_i W^+ \to f_k g$	
	44	$f_i W^+ \to f_k \gamma$	
	45	$f_i W^+ \to f_k Z^0$	
	46	$f_i W^+ \to f_k W^+$	
	47	$f_i W^+ \to f_k H^0$	
	48	$f_i H^0 \to f_i g$	
	49	$f_i H^0 \to f_i \gamma$	
	50	$f_i H^0 \to f_i Z^0$	
	51	$f_i H^0 \to f_k W^+$	
	52	$f_i H^0 \to f_i H^0$	
+	53	$gg \to f_k \bar{f}_k$	[Com77, Ben84]
+	54	$g\gamma \to f_k \bar{f}_k$	[Duk82]
	55	$gZ^0 \to f_k \bar{f}_k$	
	56	$gW^+ \to f_k \bar{f}_l$	
	57	$gH^0 \to f_k \bar{f}_l$	
+	58	$\gamma\gamma \to f_k \bar{f}_k$	[Bar90]
	59	$\gamma Z^0 \to f_k \bar{f}_k$	
	60	$\gamma W^+ \to f_k \bar{f}_l$	
	61	$\gamma H^0 \to f_k \bar{f}_k$	
	62	$Z^0 Z^0 \to f_k \bar{f}_k$	
	63	$Z^0 W^+ \to f_k \bar{f}_l$	
	64	$Z^0 H^0 \to f_k \bar{f}_k$	
	65	$W^+ W^- \to f_k \bar{f}_k$	
	66	$W^+ H^0 \to f_k \bar{f}_l$	
	67	$H^0 H^0 \to f_k \bar{f}_k$	
+	68	$gg \to gg$	[Com77, Ben84]
+	69	$\gamma\gamma \to W^+ W^-$	[Kat83]
+	70	$\gamma W^+ \to Z^0 W^+$	[Kun87]
+	71	$Z^0 Z^0 \to Z^0 Z^0$ (longitudinal)	[Abb87]
+	72	$Z^0 Z^0 \to W^+ W^-$ (longitudinal)	[Abb87]
+	73	$Z^0 W^+ \to Z^0 W^+$ (longitudinal)	[Dob91]
	74	$Z^0 H^0 \to Z^0 H^0$	
	75	$W^+ W^- \to \gamma\gamma$	
+	76	$W^+ W^- \to Z^0 Z^0$ (longitudinal)	[Ben87b]
+	77	$W^+ W^\pm \to W^+ W^\pm$ (longitudinal)	[Dun86, Bar90a]
	78	$W^+ H^0 \to W^+ H^0$	
	79	$H^0 H^0 \to H^0 H^0$	
+	80	$q_i \gamma \to q_k \pi^\pm$	[Bag82]

Table 3: Kódy sub-procesov, *časť 3.*, + v 1. stĺpci znamená, že proces je implementovaný, 2. stĺpec udáva referenčné číslo subprocesu (ISUB).

In	No.	Subprocess	Reference
		c) $2 \to 2$, tree, massive final quarks	
+	81	$f_i\bar{f}_i \to Q_k\bar{Q}_k$	[Com79]
+	82	$gg \to Q_k\bar{Q}_k$	[Com79]
+	83	$q_if_j \to Q_kf_l$	[Zer90]
+	84	$g\gamma \to Q_k\bar{Q}_k$	[Fon81]
+	85	$\gamma\gamma \to F_k\bar{F}_k$	[Bar90]
+	86	$gg \to J/\psi g$	[Bai83]
+	87	$gg \to \chi_{0c}g$	[Gas87]
+	88	$gg \to \chi_{1c}g$	[Gas87]
+	89	$gg \to \chi_{2c}g$	[Gas87]
		d) 'minimum bias'	
+	91	elastic scattering	[Sch93b]
+	92	single diffraction ($AB \to XB$)	[Sch93b]
+	93	single diffraction ($AB \to AX$)	[Sch93b]
+	94	double diffraction	[Sch93b]
+	95	low-$p_\perp$ production	[Sjö87]
		e) $2 \to 1$, loop	
	101	$gg \to Z^0$	
+	102	$gg \to H^0$	[Eic84]
+	103	$\gamma\gamma \to H^0$	[Dre89]
		f) $2 \to 2$, box	
+	110	$f_i\bar{f}_i \to \gamma H^0$	[Ber85a]
+	111	$f_i\bar{f}_i \to gH^0$	[Ell88]
+	112	$f_ig \to f_iH^0$	[Ell88]
+	113	$gg \to gH^0$	[Ell88]
+	114	$gg \to \gamma\gamma$	[Con71, Ber84, Dic88]
+	115	$gg \to g\gamma$	[Con71, Ber84, Dic88]
	116	$gg \to \gamma Z^0$	
	117	$gg \to Z^0Z^0$	
	118	$gg \to W^+W^-$	
	119	$\gamma\gamma \to gg$	
		g) $2 \to 3$, tree	
+	121	$gg \to Q_k\bar{Q}_kH^0$	[Kun84]
+	122	$q_i\bar{q}_i \to Q_k\bar{Q}_kH^0$	[Kun84]
+	123	$f_if_j \to f_if_jH^0$ (ZZ fusion)	[Cah84]
+	124	$f_if_j \to f_kf_lH^0$ (W^+W^- fusion)	[Cah84]
+	131	$gg \to Z^0Q_k\bar{Q}_k$	[Eij90]

Table 4: Kódy sub-procesov, *časť 4.*, + v 1. stĺpci znamená, že proces je implementovaný, 2. stĺpec udáva referenčné číslo subprocesu (ISUB).

In	No.	Subprocess	Reference
		h) non-Standard Model, $2 \to 1$	
+	141	$f_i\bar{f}_i \to \gamma/Z^0/Z'^0$	[Alt89]
+	142	$f_i\bar{f}_j \to W'^+$	[Alt89]
+	143	$f_i\bar{f}_j \to H^+$	[Gun87]
+	144	$f_i\bar{f}_j \to R$	[Ben85a]
+	145	$q_i\ell_j \to L_Q$	[Wud86]
+	147	$dg \to d^*$	[Bau90]
+	148	$ug \to u^*$	[Bau90]
+	149	$gg \to \eta_{techni}$	[Eic84, App92]
+	151	$f_i\bar{f}_i \to H'^0$	[Eic84]
+	152	$gg \to H'^0$	[Eic84]
+	153	$\gamma\gamma \to H'^0$	[Dre89]
+	156	$f_i\bar{f}_i \to A^0$	[Eic84]
+	157	$gg \to A^0$	[Eic84]
+	158	$\gamma\gamma \to A^0$	[Dre89]
		i) non-Standard Model, $2 \to 2$ and $2 \to 3$	
+	161	$f_ig \to f_kH^+$	[Bar88]
+	162	$qg \to \ell L_Q$	[Hew88]
+	163	$gg \to L_Q\bar{L}_Q$	[Hew88, Eic84]
+	164	$q_i\bar{q}_i \to L_Q\bar{L}_Q$	[Hew88]
+	165	$f_i\bar{f}_i \to f_k\bar{f}_k$ (via γ^*/Z^0)	[Eic84, Lan91]
+	166	$f_i\bar{f}_j \to f_k\bar{f}_l$ (via $W^\pm$)	[Eic84, Lan91]
+	171	$f_i\bar{f}_i \to Z^0H'^0$	[Eic84]
+	172	$f_i\bar{f}_j \to W^+H'^0$	[Eic84]
+	173	$f_if_j \to f_if_jH'^0$ (ZZ fusion)	[Cah84]
+	174	$f_if_j \to f_kf_lH'^0$ (W^+W^- fusion)	[Cah84]
+	176	$f_i\bar{f}_i \to Z^0A^0$	[Eic84]
+	177	$f_i\bar{f}_j \to W^+A^0$	[Eic84]
+	178	$f_if_j \to f_if_jA^0$ (ZZ fusion)	[Cah84]
+	179	$f_if_j \to f_kf_lA^0$ (W^+W^- fusion)	[Cah84]
+	181	$gg \to Q_k\bar{Q}_kH'^0$	[Kun84]
+	182	$q_i\bar{q}_i \to Q_k\bar{Q}_kH'^0$	[Kun84]
+	186	$gg \to Q_k\bar{Q}_kA^0$	[Kun84]
+	187	$q_i\bar{q}_i \to Q_k\bar{Q}_kA^0$	[Kun84]

Generovanie procesov v Pythii

Základom je generovanie procesov $2 \to 2$ a $2 \to 1$ *Pythia* predpokladá, že po jednom partóne z každého hadrónu sa zúčastňuje na nepružnej zrážke. Rozdelenie partónov v hadróne je dané štruktúrnymi funkciami.

Štruktúrne funkcie.

Štruktúrna funkcia $f_i^a\left(x,Q^2\right)$ parametrizuje pravdepodobnosť nájsť partón ***i*** s podielom ***x*** na energii incidentnej častice ***a***, keď táto častice podstupuje hlboko-nepružný rozptyl na škále Q^2 (prenesená hybnosť).

Normovanie štruktúrnych funkcií: $\sum_i \int_0^1 dx x f_i^a\left(x,Q^2\right)=1$.

V rámci *Pythi*e je možnosť používať 10 súborov štruktúrnych funkcií ako default sa používa *EHLQ* set *1*. Pritom *Pythia* umožňuje pripojiť aj vonkajšie knižnice štruktúrnych funkcií. Základom baryónových štruktúrnych funkcií sú protónové štruktúrne funkcie (merajú sa experimentálne). Na získanie iných štruktúrnych funkcií sa používajú symetrie rôzneho druhu. Napr. $f_u^n = f_d^p$ and $f_d^n = f_u^p$

Kinematika a účinné prierezy pre procesy 2→2

Uvažujme dve incidentné častice (CMS) každá s energiou E_{beam}. 2 partóny vstupujúce do interakcie majú 4-hybností:

$$p_1 = E_{beam}(x_1,0,0,x_1)$$

$$p_2 = E_{beam}(x_2,0,0,-x_2)$$

Invariantná hmotnosť tých 2 partónov:

$$\hat{s} = (p_1 + p_2)^2 = x_1 x_2 \cdot s$$

Namiesto x_1a x_2 sa často používajú τ a y:

$$\tau = x_1 x_2 = \frac{\hat{s}}{s}$$

$$y = \frac{1}{2}\ln\frac{x_1}{x_2}$$

Pre popísanie kinematiky rozptylu ***1 +2 → 3+4*** potrebujeme ešte azimutálny uhol φ (uhol potočenia roviny rozptylu okolo osi zväzku) a polárny uhol $\hat{\theta}$ (uhol rozptylu partónu 3):

$$\hat{t} = (p_1 - p_2)^2 = (p_3 - p_4)^2 = -\frac{\hat{s}}{2}\left(1 + \cos\hat{\theta}\right)$$

Účinný prierez:

$$\sigma = \iiint dx_1 dx_2 d\hat{t} \cdot f_1(x_1, Q^2) \cdot f_2(x_2, Q^2) \cdot \frac{d\hat{\sigma}}{dt}$$

$$= \iiint \frac{d\tau}{\tau} dy d\hat{t} \cdot x_1 f_1(x_1, Q^2) \cdot x_2 f_2(x_2, Q^2) \cdot \frac{d\hat{\sigma}}{dt}$$

Voľba Q^2 nie je jednoznačná zvyčajne sa používa:

$$Q^2 = \hat{m}_\perp^2 = \hat{m}^2 + \hat{p}_\perp^2$$

$d\hat{\sigma}/dt$ je diferenciálny účinný prierez pre partónový rozptyl (zvyčajne QCD-proces).

<u>Produkcia rezonancií</u>

Realizuje sa prostredníctvom procesu *2 → 1*. Neuvažujúc rozpad rezonancie pre účinný prierez, ktorý nezávisí od $\hat{t}$:

$$\sigma = \iint \frac{d\tau}{\tau} dy \cdot x_1 f_1(x_1, Q^2) \cdot x_2 f_2(x_2, Q^2) \cdot \hat{\sigma}(s)$$

Pre účinný prierez rezonancie so šírkou Γ_R platí:

$$\hat{\sigma}(\hat{s}) \propto \frac{s}{\pi} \frac{m_R \Gamma_R}{(s\tau - m_R^2)^2 + m_R^2 \Gamma_R^2}$$

Γ_R sa dá vyjadriť cez parciálne šírky finálnych stavov.

Pythia umožňuje uvažovať aj procesy *2 → 3 a 2 → 4.*

Rozpady rezonancií. Dvomi spôsobmi:
Cez **LUDECY** – rozpad nestabilnej častice na základe fixovaných pravdepodobností a pritom rozpad sa uvažuje v LS rezonancie ako izotropný.
Cez **PYRESD** – umožňuje uvažovať paralelne rozpady 2 rezonancií (v *Pythii* je to default).

Neperturbatívne procesy. V Pythii sa berú do úvahy aj procesy ako elastický rozptyl ,jednoduchý a dvojitý difrakčný rozptyl.

Výber procesov v Pythii

```
COMMON/PYSUBS/ MSEL, MSUB(200), KFIN(2,-40:40),CKIN(200)
COMMON/PYPARS/ MSTP(200), PARP(200), MSTI(200), PARI(200)
```

Dáva prístup k status kódu a parametrom, ktoré ovládajú beh simulovaných procesov. Ak preddefinované hodnoty (default hodnoty) chceme zmeniť – je potrebné urobiť zmeny pred volaním ***call PYINIT*** .

Úloha :

Máme experiment v Laboratórnej sústave :

$$p + p \rightarrow \quad B^0(\overline{B}^0)$$
$$\rightarrow \qquad J/\psi + K^0(\overline{K}^0)$$
$$\rightarrow \qquad \pi^-\pi^+(\pi^0\pi^0)$$
$$\rightarrow \qquad \mu^-\mu^+$$

Energia incidentnej častice je $\boldsymbol{E_{inc}}$ = 400 GeV, 800 GeV, 3 TeV a 7 TeV.

Predpokladajme, že poznáme

- rozlíšenie miónového systému
- rozlíšenie pre $\boldsymbol{\pi^{\pm}}$ (trekový systém , resp. hadrónový kalorimeter)
- rozlíšenie elektromagnetického kalorimetra ($\boldsymbol{\pi^0}$)

Úlohy:

a) modelovať proces produkcie ***b***-kvarku via proces (1)

b) nájsť spektrá v priečnej a pozdĺžnej hybnosti pre J/ψ, $\pi^{\pm}$, π^0, $\mu^{\pm}$, ktoré majú pôvod v B-mezóne,

c) Porovnať uvedené spektrá so spektrami z procesov s ľahkými kvarkami.

d) Rekonštruovať energiu $\pi^{\pm}$, π^0 a $\mu^{\pm}$ berúc do úvahy rozlíšenie, rekonštruovať hmotnosť J/ψ a K^0 a hmotnosť B^0.