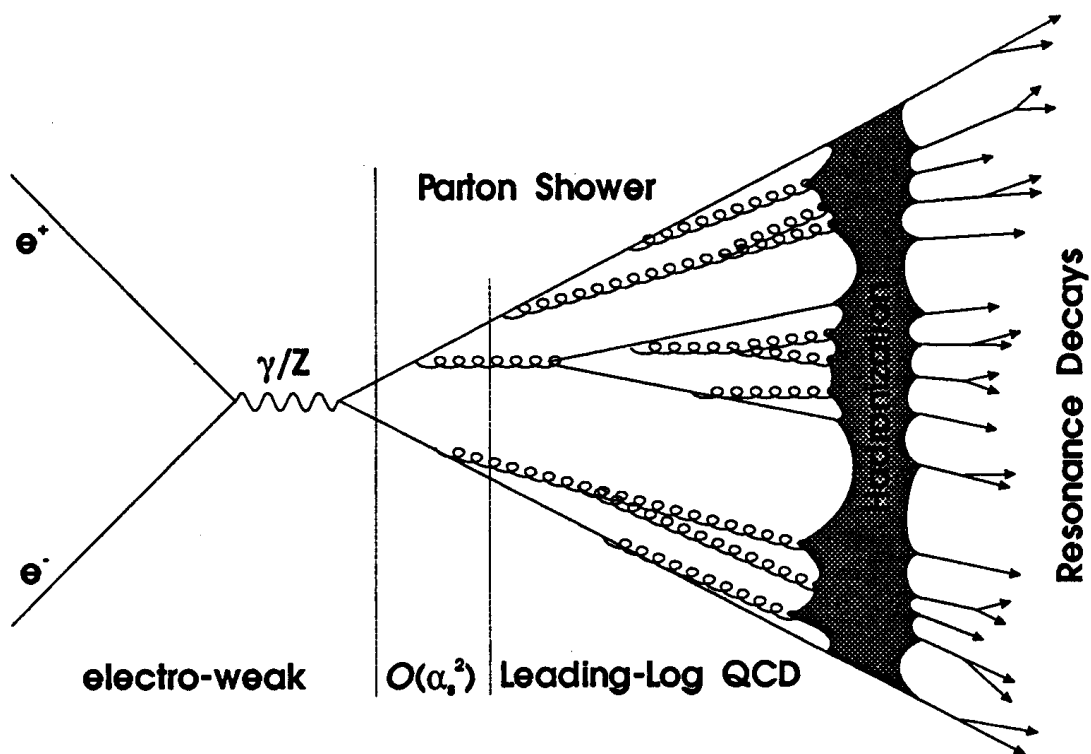


Generátor PYTHIA/JETSET

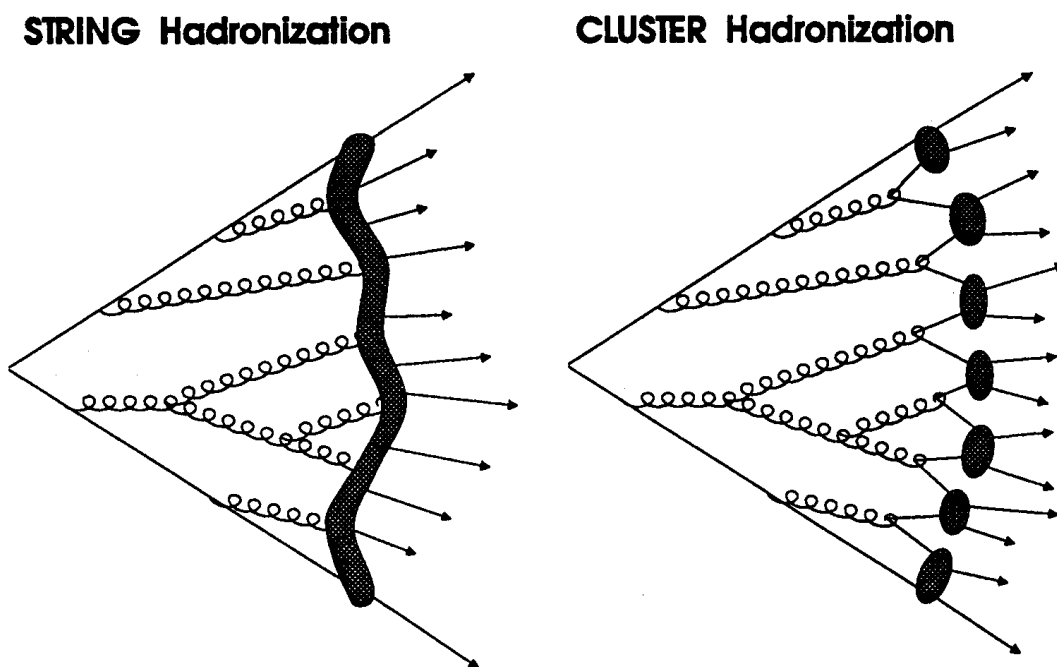
Účel: modelovanie vysokoenergetických zrážok častíc

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 spršok je po jednom partóne z každej častice, ktoré vstupujú do nepružného (hard) procesu.
4. Výstupné partóny môžu vytvárať spršky (final state showers).
5. Po východe partónového iniciátora spršky 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 $qg \rightarrow qg$.
- „Soft“ QCD-procesy (difraktívny a elastický rozptyl, procesy s malou prenesenou hybnosťou)
- produkcia ťažkých kvarkov, napr.: $gg \rightarrow tt$
- hlboko-nepružný rozptyl - $ql \rightarrow ql$
- produkcia Higgsovho bozónu (v rámci SM)
- produkcia častíc za SM, etc.

Účinný prierez pre proces $ij \rightarrow k$:

$$\sigma_{ij \rightarrow k} = \int dx_1 \int dx_2 \cdot f_i^1(x_1, Q^2) \cdot f_j^2(x_2, Q^2) \cdot \hat{\sigma}_{ij \rightarrow k}$$

kde

x_1, x_2 sú Bjorkenove premenné

Q^2 – odovzdaná hybnosť v partónovom procese

$f_i^{1(2)}$ – štruktúrne funkcie

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

Radiačné procesy v počiatočnom a konečnom stave

Ak proces obsahuje nabitý a/alebo farebný objekt $\Rightarrow$ je možnosť vyžiarovania 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 dopĺňať.

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 $\Rightarrow$ začína režim konfajnementu: farebné partóny prechádzajú v bezfarebné hadróny.

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

$\alpha_s \equiv$ väzbová konštanta silných interakcií

$n \equiv$ počet typov kvarkov,

$\Lambda \equiv$ QCD–konštanta ($\approx 200 - 300$ 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 be 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 $5 \text{ GeV} < p_{\perp} < 10 \text{ GeV}$, 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 $m_{top} = 173.8 \text{ GeV}$

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)
COMMON/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 $gg \rightarrow H, ZZ H,$ and $WW \rightarrow H$, 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 crosssections, 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(1,2)=25, and its mass is stored in P(1,5). 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	RO

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^+	Ds+	433	D_s^{*+}	Ds*+
511	B^0	B0	513	B^{*0}	B*0
521	B^+	B+	523	B^{*+}	B*+
531	B_s^0	Bs0	533	B_s^{*0}	Bs*0
541	B_c^+	Bc+	543	B_c^{*+}	Bc*+
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_b	eta.t	663	Θ	Theta
130	K_L^0	KL0			
310	K_S^0	KS0			

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_1^0	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
2112	n	n0	1114	Δ^-	Delta-
2212	p	p+	2114	Δ^0	Delta0
			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	Ξ_c^0	Xi'.c0	4314	Ξ_c^{*0}	Xi*.c0
4232	Ξ_c^+	Xi.c+			
4322	Ξ_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:

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

$$\times \text{sign}(i - j)(-1)^{\max(i, j)}$$

Baryóny:

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

KF	Printed	Meaning
110	pi_diff0	Diffractional $\pi^0/\rho^0/\gamma$ state
210	pi_diff+	Diffractional π^+ state
2110	n_diff	Diffractional n state
2210	p_diff+	Diffractional 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 $\equiv$ počet riadkov v maticiach K, P, V – prakticky je to počet častíc zúčastňujúcich sa interakcie.

K(i,1) $\equiv$ status kód častice (partónu) obsiahnutého v i -tom riadku,

K(i,2) $\equiv$ KF-kód častice (partónu),

K(i,3) $\equiv$ číslo riadku rodičovskej častice (jetu),

K(i,4) $\equiv$ 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) $\equiv$ číslo riadku číslo riadku posledného dcérskeho produktu, pre $K(i,1)=3, 13, 14$ udáva tok farby.

P(i,1) $\equiv p_x$, x -zložka hybnosti v GeV/c .

P(i,2) $\equiv p_y$, y -zložka hybnosti v GeV/c .

P(i,3) $\equiv p_z$, z -zložka hybnosti v GeV/c .

P(i,4) $\equiv E$, energia v GeV .

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

V(i,1) $\equiv x$ súradnica produkčného vertexu v mm .

V(i,2) $\equiv y$ súradnica produkčného vertexu v mm .

V(i,3) $\equiv z$ súradnica produkčného vertexu v mm .

V(i,4) $\equiv t$ čas produkčného vertexu v mm/c ($\approx 3.33 \times 10^{-12}s$).

V(i,5) $\equiv \tau$ doba života častice v mm/c ($\approx 3.33 \times 10^{-12}s$).

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 subprocessu (ISUB).

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

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

In	No.	Subprocess	Reference
		b) $2 \rightarrow 2$, tree (cont'd)	
	41	$f_i Z^0 \rightarrow f_k W^+$	
	42	$f_i Z^0 \rightarrow f_k H^0$	
	43	$f_i W^+ \rightarrow f_k g$	
	44	$f_i W^+ \rightarrow f_k \gamma$	
	45	$f_i W^+ \rightarrow f_k Z^0$	
	46	$f_i W^+ \rightarrow f_k W^+$	
	47	$f_i W^+ \rightarrow f_k H^0$	
	48	$f_i H^0 \rightarrow f_k g$	
	49	$f_i H^0 \rightarrow f_k \gamma$	
	50	$f_i H^0 \rightarrow f_k Z^0$	
	51	$f_i H^0 \rightarrow f_k W^+$	
	52	$f_i H^0 \rightarrow f_k H^0$	
+	53	$g g \rightarrow f_k \bar{f}_k$	[Com77, Ben84]
+	54	$g \gamma \rightarrow f_k \bar{f}_k$	[Duk82]
	55	$g Z^0 \rightarrow f_k \bar{f}_k$	
	56	$g W^+ \rightarrow f_k \bar{f}_l$	
	57	$g H^0 \rightarrow f_k \bar{f}_l$	
+	58	$\gamma \gamma \rightarrow f_k \bar{f}_k$	[Bar90]
	59	$\gamma Z^0 \rightarrow f_k \bar{f}_k$	
	60	$\gamma W^+ \rightarrow f_k \bar{f}_l$	
	61	$\gamma H^0 \rightarrow f_k \bar{f}_k$	
	62	$Z^0 Z^0 \rightarrow f_k \bar{f}_k$	
	63	$Z^0 W^+ \rightarrow f_k \bar{f}_l$	
	64	$Z^0 H^0 \rightarrow f_k \bar{f}_k$	
	65	$W^+ W^- \rightarrow f_k \bar{f}_k$	
	66	$W^+ H^0 \rightarrow f_k \bar{f}_l$	
	67	$H^0 H^0 \rightarrow f_k \bar{f}_k$	
+	68	$g g \rightarrow g g$	[Com77, Ben84]
+	69	$\gamma \gamma \rightarrow W^+ W^-$	[Kat83]
+	70	$\gamma W^+ \rightarrow Z^0 W^+$	[Kun87]
+	71	$Z^0 Z^0 \rightarrow Z^0 Z^0$ (longitudinal)	[Abb87]
+	72	$Z^0 Z^0 \rightarrow W^+ W^-$ (longitudinal)	[Abb87]
+	73	$Z^0 W^+ \rightarrow Z^0 W^+$ (longitudinal)	[Dob91]
	74	$Z^0 H^0 \rightarrow Z^0 H^0$	
	75	$W^+ W^- \rightarrow \gamma \gamma$	
+	76	$W^+ W^- \rightarrow Z^0 Z^0$ (longitudinal)	[Ben87b]
+	77	$W^+ W^\pm \rightarrow W^+ W^\pm$ (longitudinal)	[Dun86, Bar90a]
	78	$W^+ H^0 \rightarrow W^+ H^0$	
	79	$H^0 H^0 \rightarrow H^0 H^0$	
+	80	$q_i \gamma \rightarrow q_k \pi^\pm$	[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) $2 \rightarrow 2$, tree, massive final quarks	
+	81	$f_i \bar{f}_i \rightarrow Q_k \bar{Q}_k$	[Com79]
+	82	$gg \rightarrow Q_k \bar{Q}_k$	[Com79]
+	83	$q_i f_j \rightarrow Q_k f_l$	[Zer90]
+	84	$g\gamma \rightarrow Q_k \bar{Q}_k$	[Fon81]
+	85	$\gamma\gamma \rightarrow F_k \bar{F}_k$	[Bar90]
+	86	$gg \rightarrow J/\psi g$	[Bai83]
+	87	$gg \rightarrow \chi_{0c} g$	[Gas87]
+	88	$gg \rightarrow \chi_{1c} g$	[Gas87]
+	89	$gg \rightarrow \chi_{2c} g$	[Gas87]
		d) 'minimum bias'	
+	91	elastic scattering	[Sch93b]
+	92	single diffraction ($AB \rightarrow XB$)	[Sch93b]
+	93	single diffraction ($AB \rightarrow AX$)	[Sch93b]
+	94	double diffraction	[Sch93b]
+	95	low- $p_\perp$ production	[Sjö87]
		e) $2 \rightarrow 1$, loop	
	101	$gg \rightarrow Z^0$	
+	102	$gg \rightarrow H^0$	[Eic84]
+	103	$\gamma\gamma \rightarrow H^0$	[Dre89]
		f) $2 \rightarrow 2$, box	
+	110	$f_i \bar{f}_i \rightarrow \gamma H^0$	[Ber85a]
+	111	$f_i \bar{f}_i \rightarrow g H^0$	[Ell88]
+	112	$f_i g \rightarrow f_i H^0$	[Ell88]
+	113	$gg \rightarrow g H^0$	[Ell88]
+	114	$gg \rightarrow \gamma\gamma$	[Con71, Ber84, Dic88]
+	115	$gg \rightarrow g\gamma$	[Con71, Ber84, Dic88]
	116	$gg \rightarrow \gamma Z^0$	
	117	$gg \rightarrow Z^0 Z^0$	
	118	$gg \rightarrow W^+ W^-$	
	119	$\gamma\gamma \rightarrow gg$	
		g) $2 \rightarrow 3$, tree	
+	121	$gg \rightarrow Q_k \bar{Q}_k H^0$	[Kun84]
+	122	$q_i \bar{q}_i \rightarrow Q_k \bar{Q}_k H^0$	[Kun84]
+	123	$f_i f_j \rightarrow f_i f_j H^0$ (ZZ fusion)	[Cah84]
+	124	$f_i f_j \rightarrow f_i f_j H^0$ ($W^+ W^-$ fusion)	[Cah84]
+	131	$gg \rightarrow Z^0 Q_k \bar{Q}_k$	[Eij90]

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

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

Generovanie procesov v Pythii

Základom je generovanie procesov $2 \rightarrow 2$ a $2 \rightarrow 1$ *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 $f_i^a(x, Q^2)$ parametrizuje pravdepodobnosť nájsť partón i s podielom x na energii incidentnej častice a , keď táto častica podstupuje hlboko-nepružný rozptyl na škále Q^2 (prenesená hybnosť).

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

V rámci *Pythie* 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 $2 \rightarrow 2$

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

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

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

Invariantná hmotnosť tých 2 partónov:

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

Namiesto x_1 a 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 $1 + 2 \rightarrow 3 + 4$ potrebujeme ešte azimutálny uhol φ (uhol potočenia roviny rozptylu okolo osi zväzku) a polárny uhol $\hat{\theta}$ (uhol rozptylu partónu 3):

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

Účinný prierez:

$$\begin{aligned}\sigma &= \iiint dx_1 dx_2 d\hat{t} \cdot f_1(x_1, Q^2) \cdot f_2(x_2, Q^2) \cdot \frac{d\hat{\sigma}}{d\hat{t}} \\ &= \iiint \frac{d\tau}{\tau} dy d\hat{t} \cdot x_1 f_1(x_1, Q^2) \cdot x_2 f_2(x_2, Q^2) \cdot \frac{d\hat{\sigma}}{d\hat{t}}\end{aligned}$$

Voľba Q^2 nie je jednoznačná zvyčajne sa používa:

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

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

Produkcia rezonancií

Realizuje sa prostredníctvom procesu $2 \rightarrow 1$. 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 $2 \rightarrow 3$ a $2 \rightarrow 4$.

Rozpady rezonancií. Dvomi spôsobmi:

Cez **LUDECY** – rozpad nestabilnej častice na základe fixovaných pravdepodobností a pritom rozpad sa uvažuje v LS rezonancie ako izotropný.

Cez **PYRES** – 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 dvojité 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 :

$$\begin{aligned} p + p &\rightarrow B^0 (\bar{B}^0) \\ &\rightarrow J/\psi + K^0 (\bar{K}^0) \\ &\rightarrow \pi^- \pi^+ (\pi^0 \pi^0) \\ &\rightarrow \mu^- \mu^+ \end{aligned}$$

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

Predpokladajme, že poznáme

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