

Úloha č. 6

Simulace průchodu částic hadronovým kalorimetrem

Počítačová simulace odezvy hadronového kalorimetru v experimentu ATLAS, který je budován na urychlovači LHC v Evropském středisku pro jaderný výzkum CERN (www.cern.ch). Simulace umožňuje vizualizaci průchodu částic hmotou kalorimetru (interaktivní verze) a výpočet energetických ztrát ve všech jeho částech (batchová verze).

Úkoly

1. Seznámit se s interaktivní verzí simulací
2. Prostudovat charakter interakcí různých částic v hadronovém kalorimetru
3. Kvantitativně srovnat energetické ztráty v kalorimetru pro různé druhy částic

1 Hadronové kalorimetry

Hadronový kalorimetr umožňuje měřit energii a směr nabitých i neutrálních částic. Měření energie je založeno na úplném pohlcení původní částice. Vletí-li do kalorimetru vysoko-energetická částice, interaguje s jádry materiálu kalorimetru a vytváří tak sekundární částice. Mají-li sekundární částice dostatek energie, produkuje v následných interakcích opět další částice, přičemž energie takto vytvářených sekundárních částic postupně klesá. Tento proces se nazývá sprška (kaskáda). Klesne-li energie částic pod určitou mez, proces tvorby sekundárních částic se zastaví a částice dále ztrácejí energii ionizací až se úplně zastaví. Tím sprška vyvolaná původní částicí končí.

Hadronové kalorimetry se skládají ze střídajících se vrstev tzv. absorbátoru (materiál s vysokou hustotou, např. olovo, železo) a aktivního média (např. ionizační komory, scintilátory¹), ze kterého je čten signál. V absorbátoru dochází k tvorbě sekundárních částic, které při průchodu aktivním médiem ztrácejí část své energie ve formě, kterou můžeme detekovat (volný náboj v ionizačních komorách či světelný záblesk ve scintilátoru). Výsledný signál sebraný ze všech aktivních vrstev kalorimetru je přímo úměrný energii původní částice.

Měření směru původní částice je umožněno segmentací kalorimetru do jednotlivých cel v rovině kolmé ke směru letu původních částic. Směr se udává dvojicí souřadnic (η, ϕ) , kde ϕ je azimutální úhel a η představuje tzv. pseudorapiditu:

$$\eta = -\ln \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad (1)$$

Úhel θ se měří od osy svazku, která je zároveň osou symetrie celého detektoru. Velikost cel v $\Delta\eta \times \Delta\phi$ je dána fyzikálními procesy, které chceme pozorovat.

1.1 Interakce částic v kalorimetru

Částice můžeme rozdělit do několika skupin podle toho, jakým způsobem interagují s materiálem kalorimetru:

1. částice vytvářející čistě elektromagnetickou (elmg.) spršku
2. částice produkující hadronovou spršku
3. ionizující částice
4. neinteragující částice

Do první skupiny patří e^\pm , γ , π^0 . Vletí-li do kalorimetru např. primární γ , konvertuje na pár e^+e^- , které zase vyzaří brzdné fotony atd. Tím se tvoří elmg. sprška. Neutrální pion se rozpadá

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \quad (2)$$

¹Některé typy detektorů jsou stručně popsány např. v literatuře [1].

a díky velmi krátké době života ($\tau < 10^{-16}$ s) produkuje tedy také výhradně elmg. spršku.

Hadronovou spršku produkují všechny vysoko-energetické hadrony s výjimkou již zmíněného π^0 . Hadronová sprška však sestává ze dvou komponent:

- Elmg. složka – vzniká díky produkci π^0 v interakcích hadronů s jádru materiálu kalorimetru.
- Čistě hadronová složka v sobě zahrnuje:
 - Sekundární hadrony produkované v interakcích s jádru.
 - Tzv. neviditelnou energii, kterou kalorimetr nemůže detekovat. Jde zejména o energii spotřebovanou na rozbití jader či odnesenou neinteragujícími částicemi z rozpadů hadronů (neutrína).

Z charakteru hadronové spršky proto vyplývá, že signál od elektronu je obecně větší než signál od hadronu o stejné počáteční energii. Tento nedostatek lze korigovat různými způsoby, více informací lze nalézt např. v literatuře [2].

Mezi ionizující částice patří všechny nabitě částice, jejichž energie je tak malá ($E_{\text{kin}} < 1$ GeV), že už nemohou produkovat další sekundární částice. Dále do této skupiny patří miony, které ztrácejí energii převážně ionizací v širokém rozsahu energií (např. v železe převládá radiční ztráty nad ionizačními až při energii $E_\mu \approx 600$ GeV).

Do čtvrté skupiny patří neutrína, která interagují s okolím pouze tzv. slabou interakcí. Jejich střední volná dráha λ je tak velká (např. v železe při energii neutrin 100 GeV je $\lambda = 3.5 \times 10^6$ km), že pravděpodobnost jejich interakce v kalorimetru je naprosto zanedbatelná.

1.2 Kalorimetr Tilecal

Hadronový kalorimetr Tilecal je součástí detektorového komplexu ATLAS (viz. obrázky 1, 2), na kterém se budou studovat srážky proton – proton a Pb – Pb při vysokých energiích. Toto experimentální zařízení bude spolu s urychlovačem LHC uvedeno do provozu ve středisku CERN v roce 2006.

Tilecal se skládá ze střídajících se vrstev železa (absorbátor) a scintilačních destiček (aktivní médium) – viz. obr. 3. Železné absorbátory sestávají z dlouhých desek (tzv. masterů) a menších destiček (tzv. spacerů), které se střídají se scintilátory (viz. obrázky 3, 4). Princip sběru signálu z kalorimetru ilustruje obr. 5. Část energie (zhruba 3%), kterou nabitě sekundární částice ztratí při průchodu scintilátorem, je vyzářena ve formě modrého světla, které se sbírá optickými vlákny umístěnými po obou stranách scintilační destičky. V těchto vláknech je modré světlo pohlceno, pře-vyzářeno ve žluto-zelené oblasti spektra a dovedeno do tzv. fotonásobičů, umístěných na vnějším konci kalorimetru. Ve fotonásobičích

je pak světelný signál převeden na elektrický náboj, který se pak dále elektronicky zpracovává.

Novinkou oproti předchozím kalorimetřům je podélné uspořádání scintilačních destiček vzhledem ke směru letu částic (viz. též obr. 5).

2 Začínáme

Pro spuštění simulací je nejdříve nutné se zalogovat na pracovní stanici Hewlett Packard 715/75 s operačním systémem HP-Unix, verze 10.20 .

Simulace se nacházejí v adresáři **testb** , v podadresáři **int** je interaktivní verze, ve které můžeme detailně sledovat průchod částic kalorimetrem. V podadresáři **batch** je tzv. batchová verze, která umožňuje simulaci velkého počtu případů, uložení výsledků do 'ntuplu' a pozdější zpracování.

3 Interaktivní spuštění

Nejdříve se musíme nacházet v adresáři **testb/int** . Odtud spustíme příkaz

```
> atlsim -l calo_run ,
```

potvrdíme klávesou **Return** výběr grafického okna a během asi dvou minut je systém připraven pro interaktivní práci.

Další důležité a užitečné příkazy :

```
> KINE 0 11. 20. 25. 0.3 0.4 0.01 0.05 0
```

nastavení kinematických parametrů generované částice. V našem případě:

- 11. – kód pro elektron (viz. tabulka 1)
- 20. 25. – meze pro energii částice [GeV], rovnoměrné rozdělení
- 0.3 0.4 – meze pro pseudorapiditu η (viz. vztah (1)), rovnoměrné rozdělení
- 0.01 0.05 – meze pro azimutální úhel ϕ [rad], rovnoměrné rozdělení
- 0 – mód pro energii ($1 = p_{\perp}$)

```
> exe calo_loop
```

spustí generaci eventů, případně více eventů, grafické zobrazení **1–3** je stejné, jako při užití parametrů v příkazu **dshow** .

```
> exe open filename
```

> **exe close**

první příkaz zajistí, že vše, co se generuje do grafického okna, se zároveň ukládá do postscriptového souboru filename.ps . Druhý příkaz tuto činnost ukončí a uzavře daný soubor.

> **exe calo_p2d**

> **exe calo_p3d**

nastavení parametrů pro 2D a 3D pohled, konkrétně:

- dshow 1 – boční pohled
- dshow 2 – pohled shora
- dshow 3 – drátový 3D model
- dshow 4 – realistický 3D model
- next – smazání obrazovky

> **exit**

opuštění interaktivní verze a uzavření grafického okna.

Někdy se může stát, že program tzv. 'zamrzne' a přestane reagovat na povel z klávesnice. V tom případě je nejlepší činnost programu ukončit současným stiskem kláves Ctrl+C a spustit interaktivní verzi znova od počátku.

4 Batchové spuštění

V adresáři testb/batch najdete všechny potřebné soubory. Simulace se spouští příkazem

> **delej**

Tento příkaz dokáže postupně spustit několik simulací. Příkaz pro spuštění jednotlivých simulací má tvar:

> **nice -19 ./dice file > ofile** ,

kde spouštěný program se jmenuje **dice** , první parametr 'file' označuje vstupní soubor dat ve tvaru **file.datacard** a poslední parametr 'ofile' je název výstupního souboru. Kromě toho simulace vytvoří datový soubor **file.n** , ve kterém jsou uloženy informace o každém simulovaném eventu. Takovému souboru říkáme 'ntuple' a jeho strukturu si podrobněji popíšeme v další kapitole.

První příkaz 'nice -19' nastavuje prioritu pro batchové zpracování úloh na pozadí s prioritou nižší, než ostatní procesy.

Podívejme se nyní na vstupní soubory (tj. typ *.datacard). V těchto souborech můžeme měnit celou řadu parametrů a plně tak ovládat simulace podle našich představ. Zde je výpis úvodní části jednoho ze souborů.

```
00.00 00.00 00.35 00.00
C Z-Back X-Side Beam-Eta Z-Offset
C
C == DATACARD FILE for DICE version (til0 testbeam)
C
RNDL 0 11223344
LIST
TRAP 0
C
C == Number of triggers to be processed
C
TRIG 1000
C
C == GENERATE EVENT e=11 mu=13 pi=211 g=22 pi0=111
C
KINE 0 11. 20. 20. 0.35 0.35 0. 0. 0
VERT 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
```

První řádek slouží k zadání polohy mionových stěn, některé další důležité řádky mají následující význam:

- RNDL – nastavení startovací hodnoty generátoru náhodných čísel
- TRIG – počet simulovaných případů
- KINE – standardní KINE datakarta
- VERT – souřadnice vertexu a jejich σ pro gaussovské rozmytí

5 Standardní 'ntuple'

```

*****
* Ntuple ID = 1   Entries = 2500   Tilecal_production_control *
*****
* Var n.* Type * Packing * Range          * Block * Name          *
*****
*   1 * I*4 *           * [0,3]          * TILE * Nsum
*   2 * R*4 *      28 * [0.,1000.]      * TILE * E_total(Nsum)
*   3 * U*4 *      13 * [0,8000]        * TILE * N_total(Nsum)
*   4 * I*4 *           * [0,10]        * TILE * Nreg_TILM
*   5 * R*4 *      28 * [0.,1000.]      * TILE * E_TILM(Nreg_TILM)
*   6 * U*4 *      13 * [0,8000]        * TILE * N_TILM(Nreg_TILM)
*   7 * I*4 *           * [0,10]        * TILE * Nreg_TOLM
*   8 * R*4 *      28 * [0.,1000.]      * TILE * E_TOLM(Nreg_TOLM)
*   9 * U*4 *      13 * [0,8000]        * TILE * N_TOLM(Nreg_TOLM)
*  10 * I*4 *           * [0,10]        * TILE * Nreg_TBAA
*  11 * R*4 *      28 * [0.,1000.]      * TILE * E_TBAA(Nreg_TBAA)
*  12 * U*4 *      13 * [0,8000]        * TILE * N_TBAA(Nreg_TBAA)
*  13 * I*4 *           * [0,10]        * TILE * Nreg_TOAA
*  14 * R*4 *      28 * [0.,1000.]      * TILE * E_TOAA(Nreg_TOAA)
*  15 * U*4 *      13 * [0,8000]        * TILE * N_TOAA(Nreg_TOAA)
*  16 * I*4 *           * [0,10]        * TILE * Nreg_MUWP
*  17 * R*4 *      28 * [0.,1000.]      * TILE * E_MUWP(Nreg_MUWP)
*  18 * U*4 *      13 * [0,8000]        * TILE * N_MUWP(Nreg_MUWP)
*  19 * I*4 *           * [0,10]        * TILE * Nreg_MUWM
*  20 * R*4 *      28 * [0.,1000.]      * TILE * E_MUWM(Nreg_MUWM)
*  21 * U*4 *      13 * [0,8000]        * TILE * N_MUWM(Nreg_MUWM)
*  22 * I*4 *           * [0,10]        * TILE * Nreg_MUWZ
*  23 * R*4 *      28 * [0.,1000.]      * TILE * E_MUWZ(Nreg_MUWZ)
*  24 * U*4 *      13 * [0,8000]        * TILE * N_MUWZ(Nreg_MUWZ)
*  25 * U*4 *        6 * [0,50]          * TILE * Npart
*  26 * R*4 *      28 * [0.,10000.]      * TILE * Egen
*  27 * R*4 *      28 * [-10.,10.]       * TILE * etagen
*  28 * R*4 *      28 * [0.,10.]         * TILE * phigen
*  29 * R*4 *      28 * [-1.E3,1.E3]     * TILE * Vertex(3)
*  30 * R*4 *      28 * [-1.E4,1.E4]     * TILE * Imp(3)
*****
* Block * Entries * Unpacked * Packed * Packing Factor *
* TILE *   2500   *    656   *   Var. *   Variable   *
* Total *    --   *    656   *   Var. *   Variable   *
* Blocks = 1      Variables = 30      Max. Columns = 164 *
*****

```

V batchové verzi simulačního programu jsou vytvořeny standardní 'ntuply' s **ID = 1** a s označením **Tilecal_production_control**. Proměnné mají následující význam:

- Nsum – dimenze pro E_total
- E_total – deponovaná energie ve scintilátorech, (1)=všude, (2)=v modulu0, (3)=ve starých modulech
- E_TILM – deponovaná energie ve scintilátorech ve třech jednotlivých samplech modulu0 (1–3)
- E_T0LM – deponovaná energie ve scintilátorech ve starých modulech (1–5)
- E_TBAA – deponovaná energie v mrtvém materiálu modulu0, (1)=absorbátor, (2)=girder, (3)=end plate, (4)=front plate
- E_TOAA – deponovaná energie v mrtvém materiálu starých modulů (součet), (1–4) stejné jako v předchozím případě
- E_MUWP – deponovaná energie v zadní mionové stěně (scintilátory z Prahy)
- E_MUWM – deponovaná energie v zadní mionové stěně (scintilátory z Michiganu)
- E_MUWZ – deponovaná energie v boční mionové stěně
- Egen, Etagen, Phigen – generovaná energie, pseudorapidita η a úhel ϕ
- Vertex – počáteční vertex původní částice (1=x, 2=y, 3=z)
- Imp – počáteční impuls částice (1=Px, 2=Py, 3=Pz)

6 HP-Unix

HP-Unix je verze unixu implementovaná na pracovních stanicích Hewlett Packard a až na drobné odchylky používá stejné příkazy, jako každý jiný unixový operační systém (např. Linux).

Po nalogování má uživatel k dispozici tři 'pracovní prostory', které se nacházejí vpravo dole a jsou označeny **Desk 0-2**. V každém prostoru si může uživatel otevřít několik 'oken' a v nich spouštět různé aplikace. V jednom prostoru může běžet interaktivní verze, ve druhém batchová a třetí prostor zůstane plně k dispozici uživateli. Pro práci je třeba znát několik málo příkazů OS HP-Unix.

- cd DIR – přechod do adresáře 'DIR'
- ll *.ps – vylistování všech souborů s koncovkou 'ps'
- cat file.txt – vylistování obsahu souboru 'file.txt'
- pico data.dat – puštění editoru k úpravě souboru 'data.dat'
- exit – ukončení práce v 'okně' = zavření aplikace 'xterm'

7 PAW

Physics Analysis Workstation (PAW) je interaktivní program na analýzu a zpracování dat. Je implementován na širokém okruhu platforem od sálového počítače IBM přes pracovní stanice DEC, HP, IBM, SG, SUN až po personální počítače. Ovládá se pomocí příkazů z příkazové řádky, umožňuje vykonávat i dávky příkazů, které jsou zapsány do souborů s koncovkou ***.kumac**. Těmto souborům pak zkráceně říkáme '**kumaky**'. Novější verze programu PAW++ pracuje s grafickým rozhraním.

Základními objekty, se kterými PAW pracuje jsou *vektory* = **ve**, *histogramy* = **hi** a *ntuply* = **nt**. Některé příkazy (fit, plot, print) se mohou vztahovat k více objektům, proto je třeba specifikovat, zda pracujeme s **vektorem**, **histogramem** nebo **ntuplem**. Objekt a příkaz oddělujeme /.

Naším úkolem bude z datového souboru vytvořit postscriptový obrázek se dvěma histogramy. Popíšeme si několik příkazů, které nám v tom pomohou.

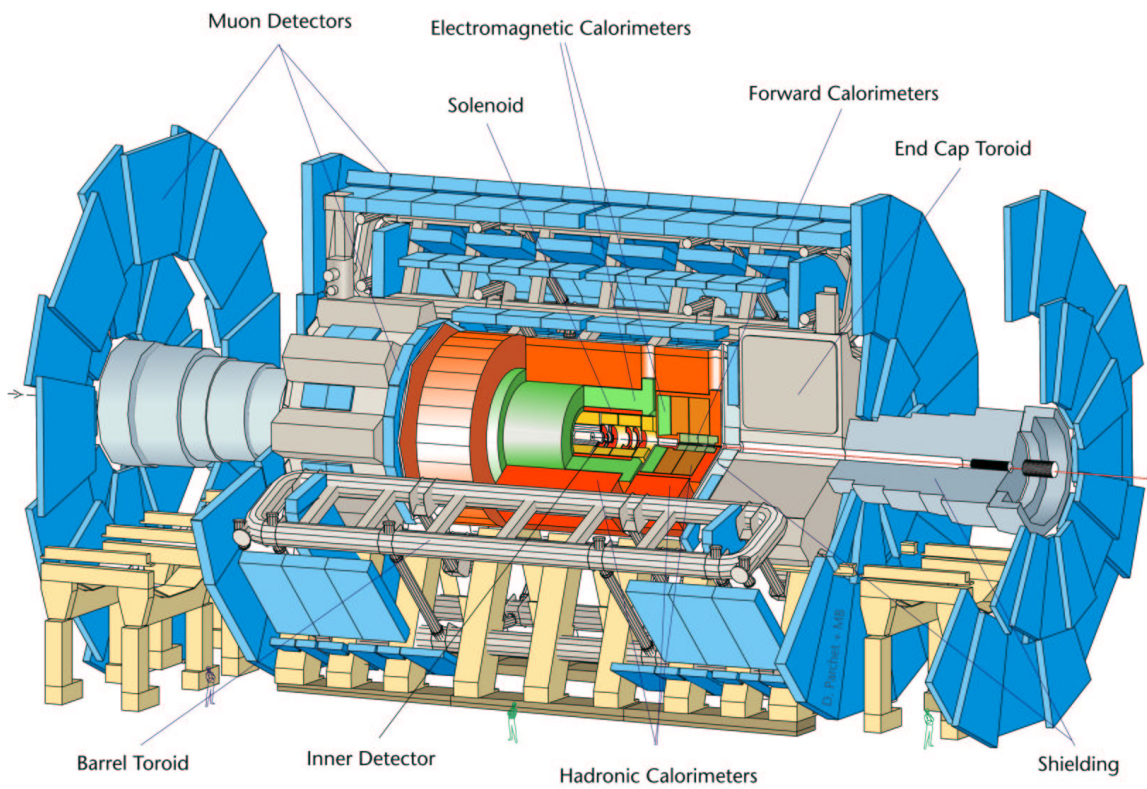
- **paw (exit)** – spuštění (ukončení) programu PAW
- **opt stat** – zapíná výpis základní statistiky
- **opt fit** – zapíná výpis výsledných informací z fitování
- **opt hstat** – zapíná přesnější počítání statistických veličin
- **opt file** – zapíná výpis názvu používaného datového souboru
- **opt date** – zapíná výpis aktuálního data a času
- **opt n***** – vypíná požadovanou option *** (**nsta** vypíná **stat**, atp.)
- **zone 2 3** – rozdělí grafické okno na 6 částí (2 sloupce x 3 řádky)
- **hi/file 80 file.n** – načte do logické jednotky 80 (lun80) 'file.n'
- **cd //lun80** – přístup do dané logické jednotky
- **nt/print 1** – vypíše seznam proměných v ntuplu 1
- **nt/plot 1.Egen** – vyplotuje proměnou 'Egen' z ntuplu 1
- **ldhis 50 En 40 1. 5.** – vytvoří histogram 50 s názvem 'En', 40 binů od 1 do 5
- **hi/plot 50** – vyplotuje obsah histogramu 50
- **hi/fit 50 g** – nafituje histogram 50 gaussovskou funkcí
- **nt/proj 50 1.Egen** – proměná 'Egen' z ntuplu 1 se uloží do histogramu 50
- **exe file** – spustí dávku uloženou v souboru 'file.kumac'
- **exe open XX** – spustí dávku 'open.kumac', ta otevře postscriptový soubor 'XX.ps'
- **exe close** – spustí dávku 'close.kumac', která uzavře otevřený soubor

Reference

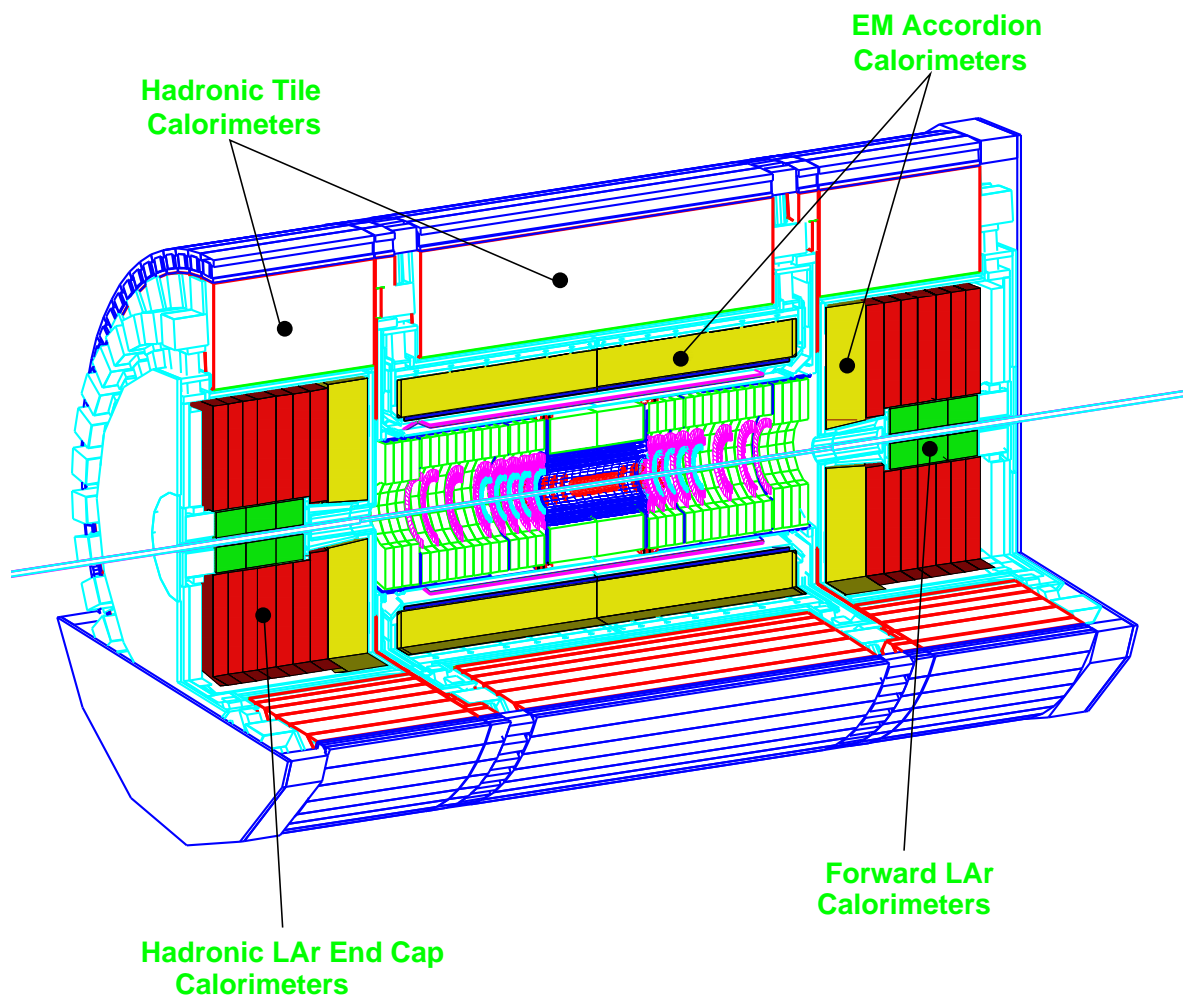
- [1] I. Úlehla, M. Suk, Z. Trka: *Atomy, jádra, částice*, Academia, Praha 1990
- [2] T. Ferbel et al.: *Experimental Techniques in High Energy Physics*, Addison-Wesley Publishing Company, 1987
- [3] *PAW – The Complete Reference* Ver. 2.03, CERN, October 1993
- [4] *ATLAS Internal Note*, TILECAL-NO-028, CERN, 1994
- [5] *ATLAS Internal Note*, TILECAL-NO-030, CERN, 1994
- [6] *ATLAS Internal Note*, TILECAL-NO-51, CERN, 1995

Částice	e^-	e^+	ν_e	μ^-	μ^+	ν_μ	γ	π^0	π^+	π^-	n	p
Npar	11	-11	12	13	-13	14	22	111	211	-211	2112	2212

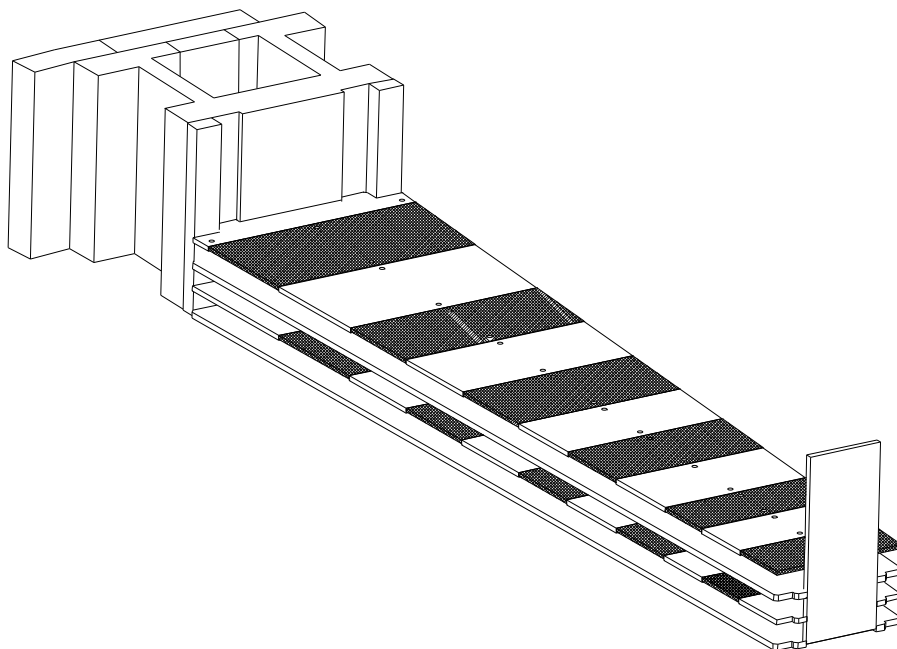
Tabulka 1: Npar - druhý parametr příkazu KINE (číslo částice)



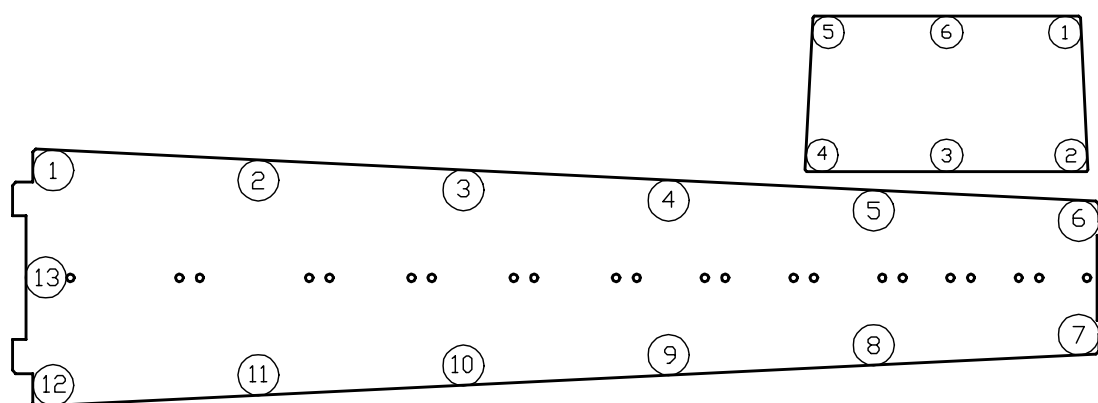
Obrázek 1: Celkový pohled na detektory experimentu ATLAS



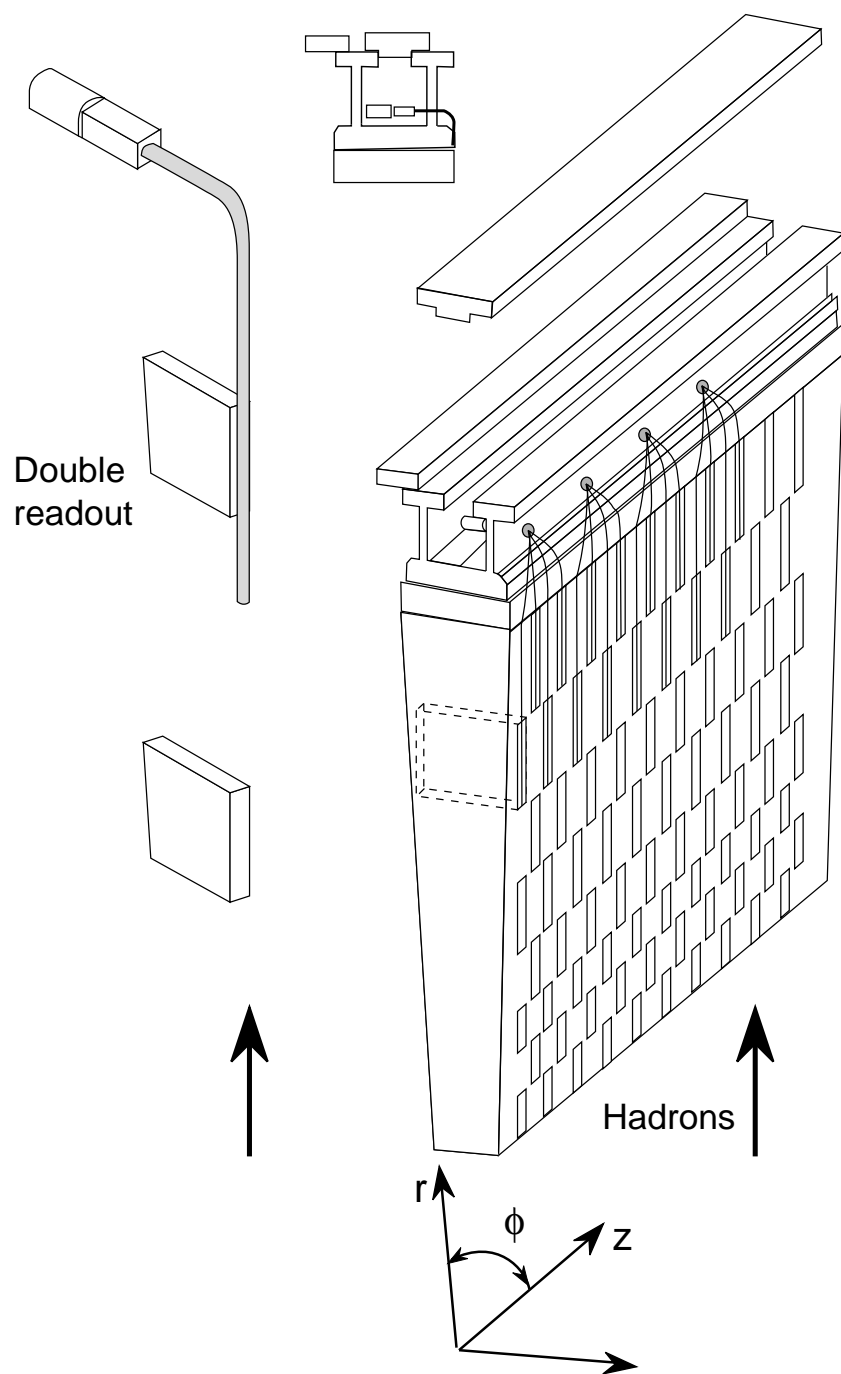
Obrázek 2: Kalorimetry v experimentu ATLAS.



Obrázek 3: Základní struktura kalorimetru Tilecal: střídání železa (bílé části) a scintilátorů (šrafované části).



Obrázek 4: Master a spacer, ocelové součásti kalorimetru



Obrázek 5: Princip sběru signálu z kalorimetru Tilecal. Signál se registruje z každé stany jiným fotonásobičem.