

ALICE Collaboration

09/05/2008

Condições experimentais do LHC

ALICE : Physics Performance Report,
Volume 1

Marcel Figueredo



Tópicos

- Estratégia para o funcionamento;
- Luminosidade;
- Luminosidade em diversos experimentos;
- Colisões pp, Pb-Pb e pA;
- Determinação da luminosidade no ALICE;
- Condições de fundo.



Condições experimentais do LHC

- O sucesso do ALICE não depende somente da performance dos detectores. Depende também:
 - do número de eventos que podem ser coletados;
 - do número de sistemas de colisão que podem ser estudados;
 - das condições de fundo no LHC.
- O número de eventos coletados depende da natureza e da energia do feixe, da luminosidade, e o tempo de máquina.



Estratégia para o funcionamento

- O programa será baseado em duas vertentes:
 - a colisão dos núcleos mais pesados disponíveis com a maior energia possível;
 - um estudo sistemático de diferentes sistemas de colisão (pp, pA, A-A) com energias de feixe diferentes;



Estratégia para o funcionamento

- O programa ALICE pode ser dividido em duas fases:
 - uma fase inicial com prioridades baseadas no entendimento teórico atual e nos resultados do SPS e RHIC;
 - um estágio subsequente com opções cuja importância será determinada após a análise dos primeiros dados do LHC.



Programa inicial

- “Runs” regulares de pp com 14 TeV;
 - Os “runs” de pp serão utilizados durante todo o tempo de operação:
 - Durante os primeiros anos → longos períodos para por o detector em uso e obter dados físicos de pp;
 - Depois → curtos períodos para iniciar e calibrar o detector para o período de íons pesados.



Programa inicial

- Programa inicial de íons pesados:
 - Pb-Pb “run” piloto → logo após o “run” de pp;
 - 1-2 anos de Pb-Pb → com o máximo de luminosidade possível, deve obter estatística suficiente;
 - 1 ano de colisões tipo pPb(pPb, dPb ou α Pb);
 - 1-2 anos de Ar-Ar.



Para a fase posterior

- Depende da análise de dados inicial. Algumas opções prováveis são:
 - Colisões de pp ou tipo-pp(dd ou $\alpha\alpha$) com 5,5 TeV
→ para comparação com os dados de Pb-Pb;
 - Outras colisões A-A com massas intermediárias (N-N, O-O, Kr-Kr pu Sn-Sn). N-N e O-O são de interesse para estudo de raios cósmicos;
 - Possivelmente outros sistemas pA (dA, α A) → para estudar a dependência com A;



Para a fase posterior

- “Runs” de Pb-Pb com energias mais baixas, para medir uma função da energia de excitação e para fazer uma conexão com os resultados do RHIC;
- Mais “runs” de Pb-Pb com alta energia para aumentar a estatística de eventos raros.



Luminosidade

- De certa forma, é o grau de intensidade de um feixe de partículas;
- O produto da luminosidade com a seção de choque informa a taxa em que um processo ocorre:

$$R = L\sigma$$

- Por exemplo, $L = 10^{11}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ indica que em uma seção reta de 1cm^2 passam 10^{11} partículas por segundo.



Luminosidade

- Um feixe de partículas não é contínuo → ele é formado por grupos (“bunches”).
- O número de partículas contidas em um “bunch” é conhecido como “bunch charge”.



Colisões A-A → Limites de luminosidade dos detectores

- Esses limites são provenientes principalmente do dispositivo de “tracking”, TPC(Time-Projection Chamber, e o espectrômetro de múon.
- O TPC limita a máxima luminosidade por causa do evento de “pile-up” durante o tempo de arrasto de 88 μs .



Limites de luminosidade dos detectores

- Luminosidade = $10^{27} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ → a probabilidade de “pile-up” é 76% para uma interação hadrônica com seção de choque igual a 8 b;
- Entretanto,
 - multiplicidade de partículas média → 20% da multiplicidade máxima;
 - só em eventos parciais ocorre “overlap” → o aumento médio da multiplicidade de “track” devido a “pile-up” é 13% para colisões centrais.



Limites de luminosidade dos detectores

- Localmente, a densidade de “track” aumenta até 26%.
- O TPC pode trabalhar com $L > 10^{27} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, em particular, se a multiplicidade se tornar pequena comparada com 8000/unid de pseudo-rapidez.
- O ganho em proporção deve ser contrabalanceado com a performance de “tracking”.



Limites de luminosidade dos detectores

- A limitação de luminosidade do espectrômetro de múon vem da máxima iluminação aceita pelas câmeras de “trigger”, RPC(Resistive-Plate Chambers), de 50-100 Hz cm⁻².
- Esse limite corresponde a um máximo de luminosidade de $(2-4)10^{28}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

“Runs” de Pb-Pb com luminosidade Nominal

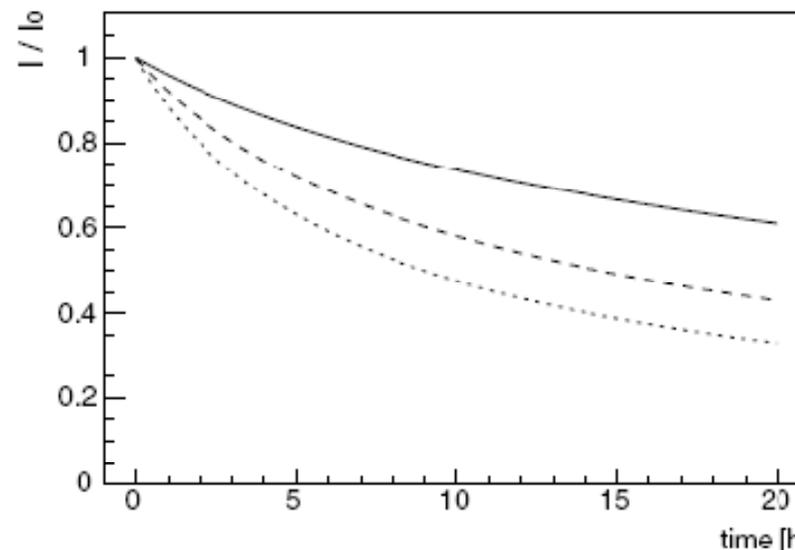
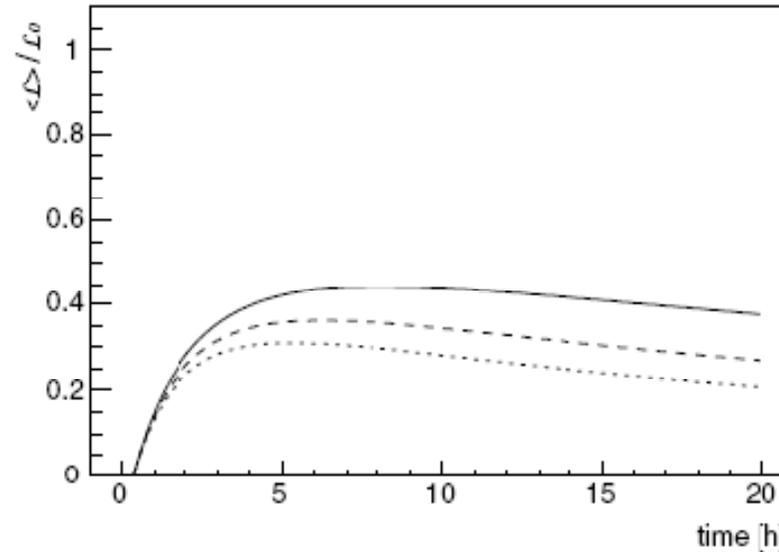
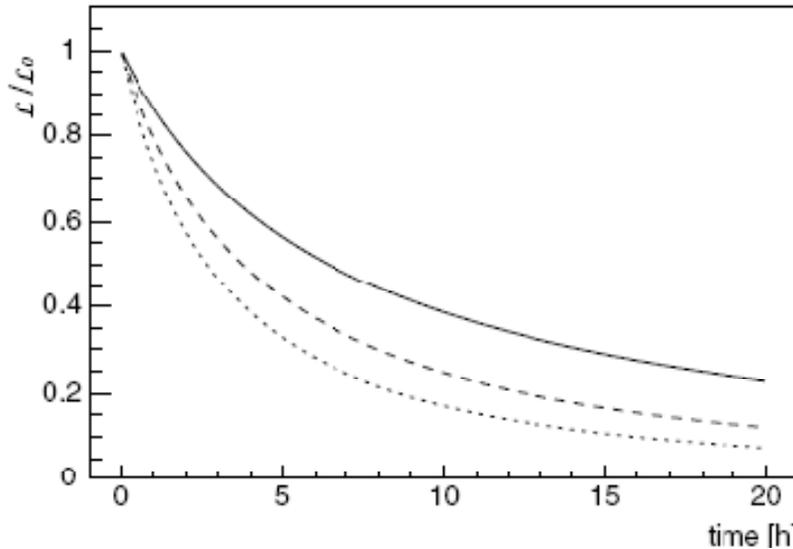
- Para uma luminosidade inicial L_0 , uma operação ideal requer uma maximização da média temporal da luminosidade dada por:

$$\langle L \rangle (t) = \frac{1}{t + T_f} \int_{t_{set-up}}^t dt' L(t')$$

$T_f \rightarrow$ Tempo de preenchimento

$t_{set-up} \rightarrow$ Tempo em que o “collider” opera mas ainda não toma dados.

Luminosidade, luminosidade média relativos a $L_0 = 10^{27} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$; $I_0 = 6.8 \times 10^7$ íons por “bunch”.

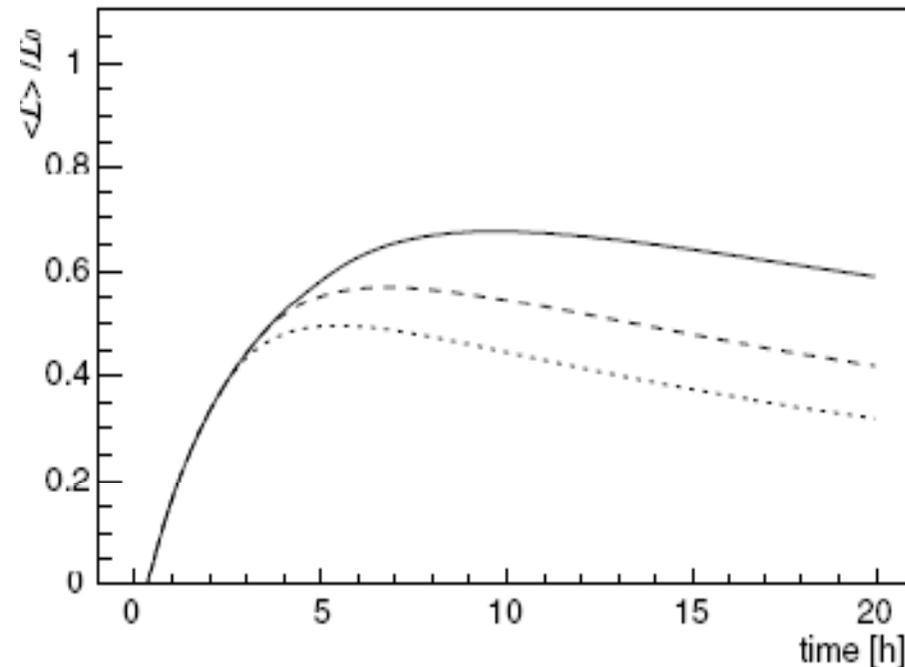
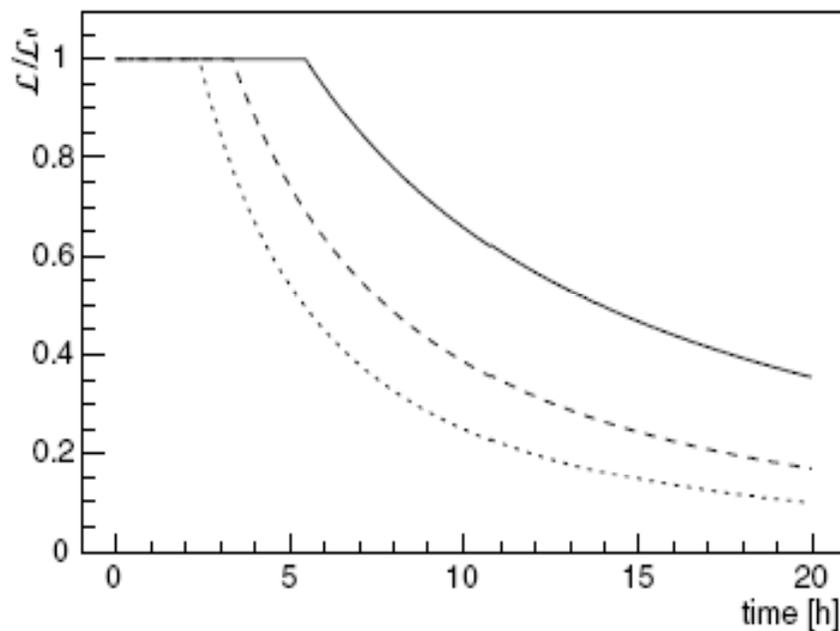


N de regiões de interação:

- 1
- - - 2
- 3

Operação com ajuste de β^* - intensidade de 10^8 íons de Pb por ramo.

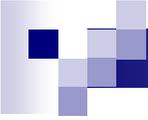
Com o ajuste de β^* a mesma média obtida para uma luminosidade inicial de $10^{27}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ pode ser obtida com $0.7L_0$, $0.55L_0$ e $0.5L_0$ para respectivamente 1, 2 e 3 experimentos.





Energia do feixe

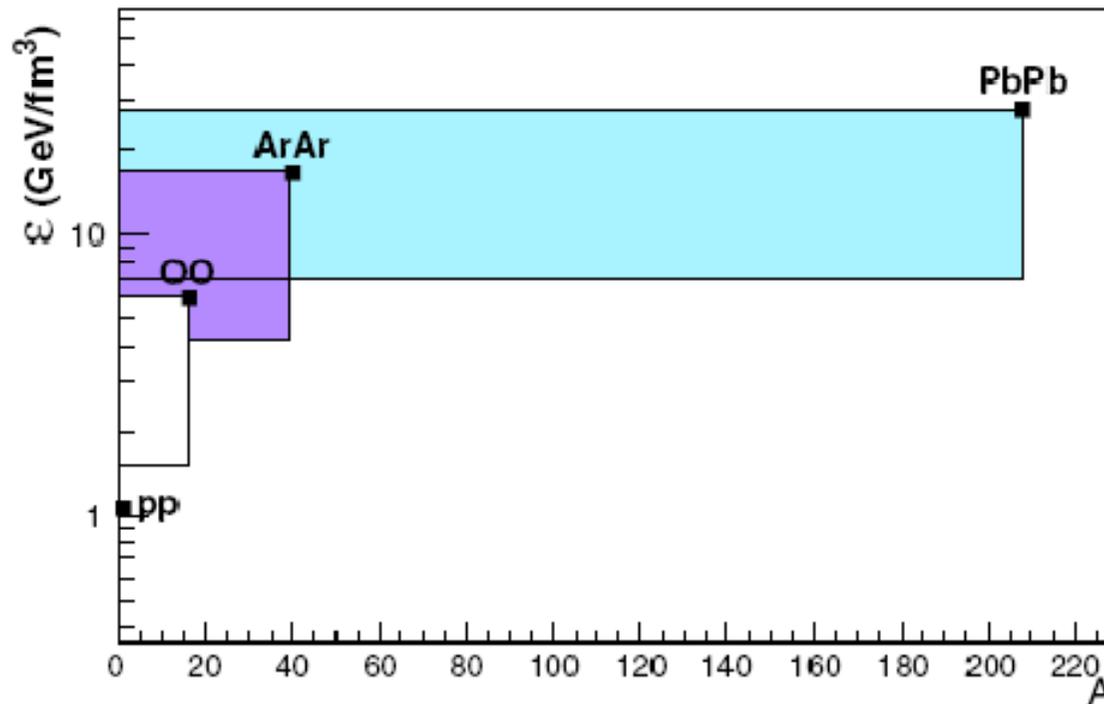
- Experimentos curtos com energias menores serão necessárias para estudar a dependência com a energia de eventos hadrônicos globais.
- Esses experimentos com energias menores vão ajudar a cobrir a lacuna em energia entre a energia máxima do RHIC(200GeV) e o LHC.



Colisões envolvendo íons com massa intermediária

- Para variar a densidade de energia. Pelo menos um sistema nessas condições será estudado durante os 5 primeiros anos de operação;
- Ar-Ar é principal opção atual:
 - $L \text{ máx} = 2.8 \times 10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ → para alcançar as taxas máximas que podemos obter com o TPC;
 - $L \text{ máx} = 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para maximizar a taxa de mésons vetoriais pesados no canal de decaimento $\rho \rightarrow \mu\mu$.

Variação da densidade de energia produzida com o sistema de colisão



Fórmula de Bjorken

$$\epsilon = 160 \text{ MeV fm}^{-3} A^{-\frac{2}{3}} \frac{dN_{ch}}{dy}$$

Máximas multiplicidades de partícula carregada: 6000(Pb-Pb), 1200(Ar-Ar), 230(O-O) e 6.5(pp). As bandas mostram o intervalo de cobertura pela mudança do parâmetro de impacto.



Intensidades máximas dos grupos(“bunches”) permitidos por efeitos de espaço-carga no SPS

Table 2.1. Maximum bunch intensities allowed by space-charge effects in the SPS and the corresponding maximum and average luminosities for one (two, three) experiments participating in the run. The limits for Ar–Ar and O–O are preliminary estimates.

System	Ions per bunch	\mathcal{L}_0 ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	$\langle \mathcal{L} \rangle / \mathcal{L}_0$
Pb–Pb	7.0×10^7	1.0×10^{27}	0.44 (0.35, 0.29)
Ar–Ar	5.5×10^8	0.6×10^{29}	0.64 (0.62, 0.60)
O–O	1.0×10^9	2.0×10^{29}	0.73 (0.70, 0.67)



Colisões próton-próton

- Colisões padrões com 14 TeV;
 - Experimentos com pp proverão dados com baixa multiplicidade, logo mais simples, para por em uso e calibrar os componentes do ALICE;
 - Para manter o “pile-up” no TPC e SDDs(Silicon Drift Detectors) em um nível aceitável, a luminosidade vai ser limitada em aprox. $5 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde a uma taxa de interação de aprox. 200kHz.



Colisões próton-próton

- Colisões tipo-pp dedicadas: (pp, dd ou $\alpha\alpha$)
 - Colisões com energia do centro de massa próxima àquela da colisão de íons pesados: 5.5-7 TeV;
- Essas colisões com pp, dd ou $\alpha\alpha$ podem ser úteis para dados de referência extra, por exemplo, para solucionar ambigüidades em interpolações de 14 TeV com energia das colisões A-A.



Colisões próton-próton

- Para uma taxa de interação de 200kHz, caso das colisões pp:
 - Luminosidade = $1.1 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \rightarrow d\bar{d}$;
 - Luminosidade = $6.2 \times 10^{28} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \rightarrow \alpha\alpha$;



Colisões pA

- Necessários para dados de referência;
- Estudo de “gluon shadowing”.
- A luminosidade ideal para experimentos pA é limitada pela taxa.
- As restrições vêm da fonte e da injeção;
- A luminosidade é prop.. ao produto das intensidades dos dois feixes → a intensidade dos íons pode ser otimizada de acordo com o p.

Colisões pA

- Com uma taxa de colisão = 200kHz:
 - Luminosidade $1.1 \times 10^{29} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ para pPb;
 - Luminosidade $3 \times 10^{29} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ para pAr.
- Para sistemas assimétricos como pA, a razão Z/A é diferente para os dois feixes → momento de 7TeV para prótons e 3.5TeV para íons.
- Energia do centro de massa por nucleon:

$$\sqrt{S_{NN}} = 14 \text{TeV} \times \sqrt{\frac{Z_1 Z_2}{A_1 A_2}}$$



Colisões pA

- O sistema do centro de massa move com relação ao sistema do lab → uma mudança Δy na rapidez central observada no sistema lab:

$$\Delta y = 0.5 \ln \frac{Z_1 A_2}{Z_2 A_1}$$

- Colisões dA e αA são mais simétricas em Z/A → energias do c.m. mais próximas aos dos íons pesados: 6.2, 6.6 TeV (dPb, dAr) e 8.8, 9.4 TeV (pPb, pAr).

Energia máxima do c.m, variação de rapidez, seções de choque geométricas, limites de luminosidade para diferentes sistemas simétricos e assimétricos.

System	$\sqrt{s_{NN,max}}$ (TeV)	Δy	σ_{geom} (b)	\mathcal{L}_{low} ($cm^{-2} s^{-1}$)	\mathcal{L}_{high} ($cm^{-2} s^{-1}$)
Pb-Pb	5.5	0	7.7	1.0×10^{27}	
Ar-Ar	6.3	0	2.7	2.8×10^{27}	1.0×10^{29}
O-O	7.0	0	1.4	5.5×10^{27}	2.0×10^{29}
N-N	7.0	0	1.3	5.9×10^{27}	2.2×10^{29}
$\alpha\alpha$	7.0	0	0.34	6.2×10^{29}	
dI	7.0	0	0.19	1.1×10^{30}	
pp	14.0	0	0.07	1.0×10^{29}	5.0×10^{30}
pPb	8.8	0.47	1.9	1.1×10^{29}	
pAr	9.4	0.40	0.72	3.0×10^{29}	
pO	9.9	0.35	0.39	5.4×10^{29}	
dPb	6.2	0.12	2.6	8.1×10^{28}	
dAr	6.6	0.05	1.1	1.9×10^{29}	
dO	7.0	0.00	0.66	3.2×10^{29}	
α Pb	6.2	0.12	2.75	7.7×10^{28}	
α Ar	6.6	0.05	1.22	1.7×10^{29}	
α O	7.0	0.00	0.76	2.8×10^{29}	

Parâmetros de máquina

	PP	Pb–Pb
Energy per nucleon (TeV)	7	2.76
β at the IP: β^* (m)	10	0.5
R.m.s. beam radius at IP: σ_t (μm)	71 ^a	15.9
R.m.s. bunch length: σ_l (cm)	7.7	7.7
Vertical crossing half-angle (μrad) for		
pos. (neg.) μ -spectr. dipole polarization	150 (150)	150 (100)
No. of bunches	2808	592
Bunch spacing (ns)	24.95	99.8
Initial number of particles per bunch	1.1×10^{11}	7.0×10^7
Initial luminosity ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	$< 5 \times 10^{30}$	10^{27} ^b

^a For low-intensity runs β^* could be 0.5 m and $\sigma_t = 15.9 \mu\text{m}$ as in Pb–Pb.

^b Early operation will be with 62 bunches and $\beta^* = 1$ m, which yields an initial luminosity of $5.4 \times 10^{25} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Parâmetros de máquina

- Região luminosa \rightarrow O tamanho da região, vértice espalhado, na aproximação Gaussiana é dada por:

$$\sigma_v = \frac{\sigma_l}{\sqrt{2}} F$$

- F é devido ao ângulo de seção finita ϕ e depende da razão entre o tamanho longitudinal σ_l e transversal σ_t do feixe:

$$F = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tan(\phi/2)\sigma_l / \sigma_t)^2}}$$



Parâmetros de máquina

- $F = 0.81$ para $\beta^* = 0.5 \text{ m} \rightarrow \sigma_v = 4.3 \text{ cm}$ para Pb-Pb;
- $F = 0.99$ Para $\beta^* = 10 \text{ m} \rightarrow \sigma_v = 4.3 \text{ cm}$ para pp.
- Um aumento considerado de 30% no “bunch length” durante o experimento \rightarrow aumenta a região luminosa de 5.4 a 7.0 cm em pp e 4.3 a 5cm em Pb-Pb.
- Com um aumento moderado do “bunch length”, não é esperado perda de eventos por vértice espalhado.



Determinação da luminosidade no ALICE

- A luminosidade, como já foi mencionado, relaciona a taxa de um processo R com sua seção de choque:

$$R = L\sigma$$

- Definida pelas características dos feixes de colisão no ponto de interação:

$$L = fN_b \frac{N^2}{2\pi(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} F$$

Onde N_b é o número de “bunches”, N o número total de partículas por “bunch”, f a frequência de revolução e $\sigma_{1,2}$ os tamanhos transversais dos dois feixes.

Determinação da luminosidade no ALICE

- Uma outra maneira consiste na medida da taxa de algum processo conhecido.
- Do teorema ótico, pode-se obter uma relação entre a taxa de eventos elásticos (R_{el}) e a taxa total de interações pp (R_{tot}):

$$L = \frac{(1 + \rho^2)}{16\pi} \frac{R_{tot}^2}{(dR_{el} / dt)_{t=0}}$$

- Onde ρ é a razão entre as partes reais e imaginárias da amplitude de espalhamento elástico

Monitoramento da luminosidade em “runs” de pp

- No ALICE, podemos medir e monitorar a luminosidade pela medida da fração $R = \text{Acc} \cdot R_{\text{tot}}$ da taxa de interações inelásticas:

$$L = \frac{R}{\text{Acc} \cdot \sigma_{inel}}$$

Acc → Aceitação do detector



Monitoramento de luminosidade em “runs” de pp

- A taxa inelástica é uma soma das taxas de processos não difrativos inelásticos (R_{nd}), unicamente difrativos (R_{sd}), e duplamente difrativos (R_{dd}).
- A aceitação do detector é diferente para cada um desses processos.

Diferentes Aceitações

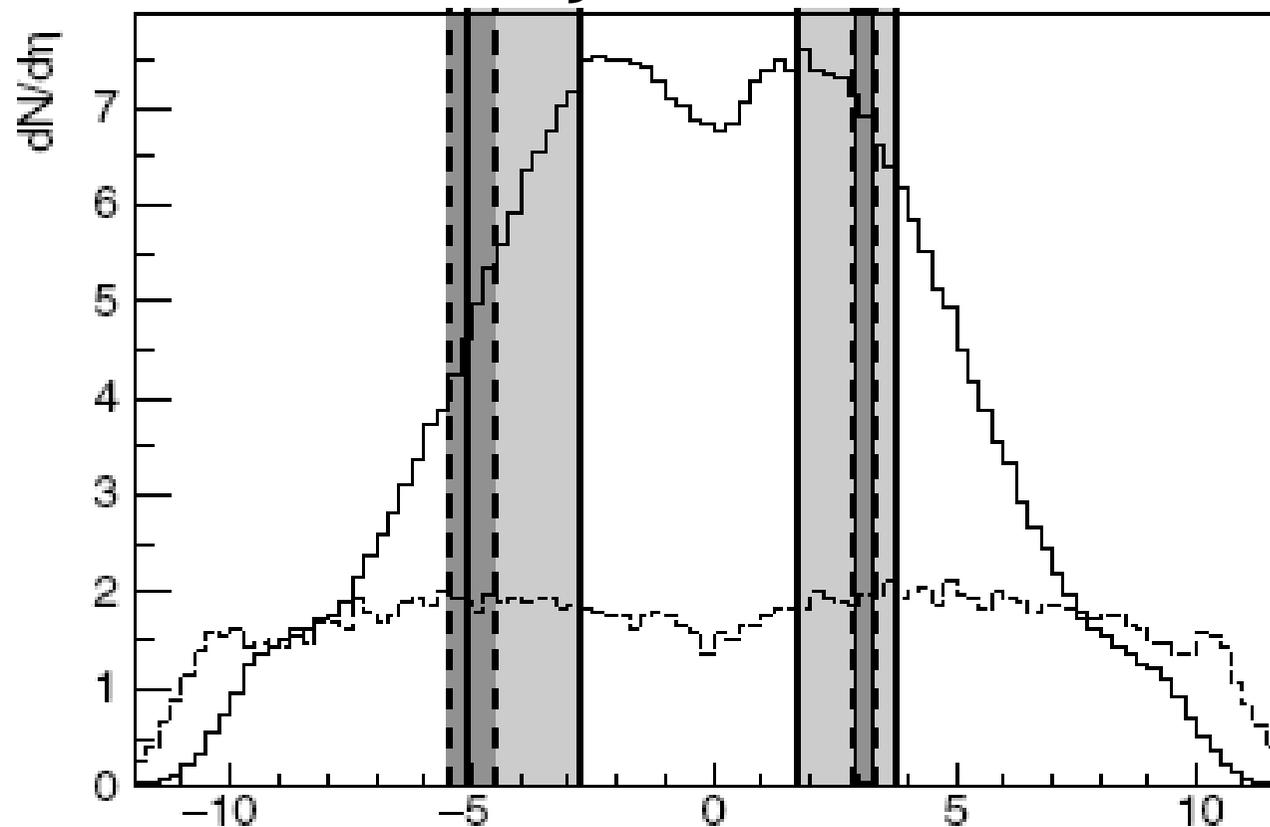
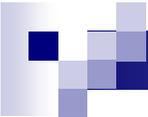


Figure 2.8. Charged-particle pseudo-rapidity distribution for pp interactions at $\sqrt{s} = 14$ TeV. Solid line: inelastic non-diffractive interactions; dashed line: diffractive interactions. The vertical lines indicate the acceptance of the forward detectors V0 (solid lines) and T0 (dashed lines).



Fundo oriundo das colisões feixe-gás na região experimental em pp

- A pressão de gás dinâmica foi simulada dentro da região experimental $\pm 20\text{m}$ ao redor do ponto de interação;
- Efeitos considerados:
 - “desorption” molecular estimulada de íons, elétrons e prótons;
 - Instabilidade de “desorption” induzida de íons;
 - Acumulação de nuvem de elétrons \rightarrow dominante.



Fundo oriundo das colisões feixe-gás na região experimental em pp

- Densidade de gás equivalente de hidrogênio em operação pp \rightarrow aprox. 2×10^{14} moléculas/m³;
- Para a operação Pb é esperada duas ordens de magnitude menores.
- A densidade de gás em operação pp leva a uma taxa de interação feixe-gás de 12kHz/m, ou seja 500kHz em toda a região experimental do ALICE, sendo que a taxa de colisão pp é 200kHz.



Taxas de doses e fluências de nêutrons

- Há três fontes principais de radiação no ALICE:
 - Partículas produzidas no plano de interação em colisões planejadas;
 - Perdas de feixe devido a algum erro de injeção, visto que o ALICE se localiza perto do ponto de injeção;
 - Interações feixe-gás em operações pp.



Taxas de doses e fluências de nêutrons

- Contribuições em relação a dose e fluência de nêutron totais:
 - Interações feixe-gás → 10%
 - Perdas de feixe → 1%
 - Contribuição oriundas de partículas produzidas no ponto de interação → Dominante.

Cenário de operação para um período de 10 anos de experimento.

	pp	Ar–Ar	Ar–Ar	Pb–Pb	dPb
$\langle \mathcal{L} \rangle$ ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	3×10^{30}	3×10^{27}	10^{29}	10^{27}	8×10^{28}
σ_{inel} (mb)	70	3000	3000	8000	2600
Rate (s^{-1})	2×10^5	9×10^3	3×10^5	8×10^3	2×10^5
Runtime (s)	10^8	1.0×10^6	2.0×10^6	5×10^6	2×10^6
Events	2×10^{13}	9×10^9	6×10^{11}	4×10^{10}	4×10^{11}
Particles per event	100	2400	2400	14 200	500
N_{tot}	2.1×10^{15}	2.2×10^{13}	1.4×10^{15}	5.7×10^{14}	2×10^{14}

1 ano de pp $\rightarrow 10^7$ s

1 ano de íons pesados $\rightarrow 10^6$ s

Doses e fluências de nêutrons em detectores e “racks” eletrônicos

System	Radius (cm)	Dose (Gy)	Neutron fluence (cm ⁻²)
SPD1	3.9	2.2×10^3	8.0×10^{11}
SPD2	7.6	5.1×10^2	5.6×10^{11}
SDD1	14	1.9×10^2	4.5×10^{11}
SDD2	24	1.0×10^2	4.2×10^{11}
SSD1	40	4.0×10^1	4.1×10^{11}
SSD2	45	2.6×10^1	4.1×10^{11}
TPC (in)	78	1.3×10^1	3.6×10^{11}
TPC (out)	278	2.0×10^0	2.4×10^{11}
TRD	320	1.6×10^0	1.5×10^{11}
PID	350	1.1×10^0	1.0×10^{11}
HMPID	490	5.0×10^{-1}	8.0×10^{10}
RackLoc1		5.6×10^{-1}	8.4×10^7
RackLoc2		3.8×10^{-1}	1.5×10^6
RackLoc3		2.2×10^{-6}	3.5×10^3
RackLoc4		7.8×10^{-6}	9.2×10^3

SPD → Silicon Pixel Detector
 SDD → Silicon Drift Detector
 SSD → Silicon Strip Detector



Fundo proveniente de nêutrons térmicos

- Colisões Pb-Pb → taxa de produção de partículas primárias 2×10^8 Hz. Muitas dessas são nêutrons.
- A perda de energia de nêutrons muito energéticos em subseqüentes espalhamentos produz um gás de nêutrons térmicos;
- Pelo fato do tempo de decaimento do sinal do nêutron ser menor que o tempo de duas colisões Pb-Pb somente materiais com alta seção de choque de captura podem obter um aumento de fundo não correlacionado com o evento.



Fundo proveniente de nêutrons térmicos

- O TRD, “Transition-Radiation Detector”, é um detector que usa Xe → ele pode obter
- Estudos levam a um esperado aumento do número de partículas inferior a 10%.