

5. Übungsblatt zur Vorlesung Experimentelle Elementarteilchenphysik

Abgabe: Montag, 15. Juni 2009, in der Vorlesung

Aufgabe 14:

(12 Punkte)

Die CKM-Matrix wurde in der Vorlesung in der Wolfenstein-Parametrisierung eingeführt. In der so genannten Standard-Parametrisierung enthält die Matrix anstatt der reellen Parameter λ , A , ϱ und η drei Winkel θ_{12} , θ_{13} und θ_{23} sowie eine komplexe Phase $e^{i\delta}$. Diese Parametrisierung kann man z. B. durch das Produkt dreier Drehmatrizen darstellen:

$$V_{\text{CKM}} = R_{23}(\theta_{23}, 0) \cdot R_{13}(\theta_{13}, -\delta) \cdot R_{12}(\theta_{12}, 0),$$

wobei die Matrizen R_{ij} definiert sind als

$$\begin{aligned} R_{12}(\theta, \phi) &= \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta e^{i\phi} & 0 \\ -\sin \theta e^{-i\phi} & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ R_{23}(\theta, \phi) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta e^{i\phi} \\ 0 & -\sin \theta e^{-i\phi} & \cos \theta \end{pmatrix}, \\ R_{13}(\theta, \phi) &= \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta e^{i\phi} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta e^{-i\phi} & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

- i) Berechnen Sie explizit die obige Parametrisierung der CKM-Matrix. Identifizieren die Parameter der Wolfenstein-Parametrisierung mit den Winkel und Phasen der Standard-Parametrisierung. Ab welcher Ordnung in λ werden in der Wolfenstein-Parametrisierung Terme vernachlässigt?

Hinweis: Benutzen Sie die Abkürzungen $s_{ij} := \sin \theta_{ij}$ und $c_{ij} := \cos \theta_{ij}$, und nehmen Sie an, dass $c_{13} = c_{23} = 1$.

- ii) Berechnen Sie Werte für λ , A und $\sqrt{\varrho^2 + \eta^2}$ unter Verwendung von Messungen der Beträge folgender CKM-Matrixelemente (zur Vereinfachung ohne Berücksichtigung der Unsicherheiten):

$$|V_{us}| \approx 0,22, \quad |V_{cb}| \approx 0,04, \quad \left| \frac{V_{ub}}{V_{cb}} \right| \approx 0,1.$$

Welche Einschränkung ergibt sich dadurch für das Unitaritätsdreieck? Konstruieren Sie das Unitaritätsdreieck unter Zuhilfenahme der Messung $\sin 2\beta \approx 0,7$.

Aufgabe 15:

(10 Punkte)

Aufgrund der vielen möglichen Parametrisierungen der CKM-Matrix ist es sinnvoll, nach Invarianten zu suchen, die die Eigenschaften der Matrix unabhängig von der Parametrisierung charakterisieren. Eine solche ist die Jarlskog-Determinante $\det C$, die ein Maß für die Größe der CP -Verletzung ist. Die Jarlskog-Determinante ergibt sich aus dem Kommutator der Fermion-Massenmatrizen $m_u^{\alpha\beta}$ und $m_d^{\alpha\beta}$:

$$\begin{aligned} [m_u^{\alpha\beta}, m_d^{\alpha\beta}] &= iC \\ \Rightarrow \det C &= -2J \times (m_t - m_c)(m_c - m_u)(m_u - m_t) \times (m_b - m_s)(m_s - m_d)(m_d - m_b). \end{aligned}$$

Den Jarlskog-Parameter J erhält man, indem man aus V_{CKM} eine beliebige 2×2 -Untermatrix auswählt und die Nicht-Diagonalelemente komplex konjugiert. J ist dann der Imaginärteil des Produkts der vier Matrixelemente, z. B.

$$J = \Im(V_{ud}V_{tb}V_{ub}^*V_{td}^*).$$

- i) Zeigen Sie (ohne eine spezielle Parametrisierung zu benutzen), dass obiges J gleich der zweifachen Fläche des (unskalierten) Unitaritätsdreiecks ist.
- ii) Bestimmen Sie J für die Standard-Parametrisierung von V_{CKM} (vgl. Aufgabe 14).
- iii) Im Standardmodell tritt dann und nur dann CP -Verletzung auf, wenn die Jarlskog-Determinante nicht verschwindet: $\det C \neq 0$. Welche 14 Bedingungen ergeben daraus für die CP -Verletzung im Standardmodell?

Hinweis: $\theta_{ij} \in [0, \pi/2]$, $\delta \in [0, 2\pi]$.

Aufgabe 16:

(15 Punkte)

In den folgenden Abbildungen sind 16 Beispiele für verschiedene Klassen von Ereignissen am e^+e^- -Collider LEP gezeigt. Identifizieren Sie die Physikprozesse und skizzieren Sie die zugehörigen Feynman-Diagramme für diejenigen Ereignisse, die durch den Collider erzeugt wurden.

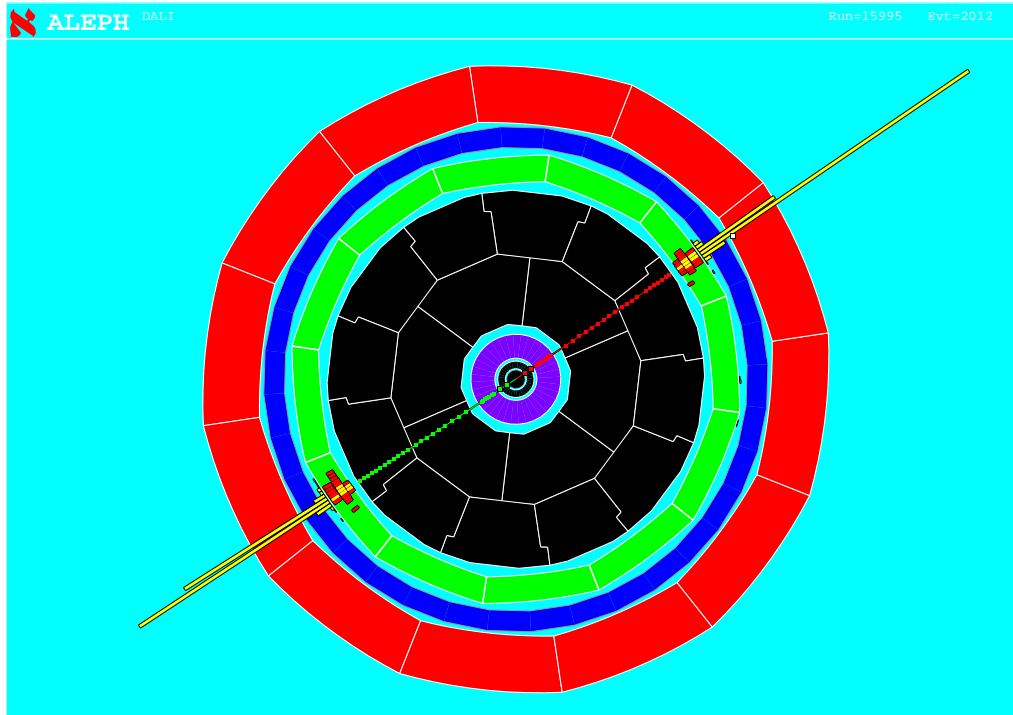


Abbildung 1: Ereignis 1 (ALEPH) in xy -Ansicht.

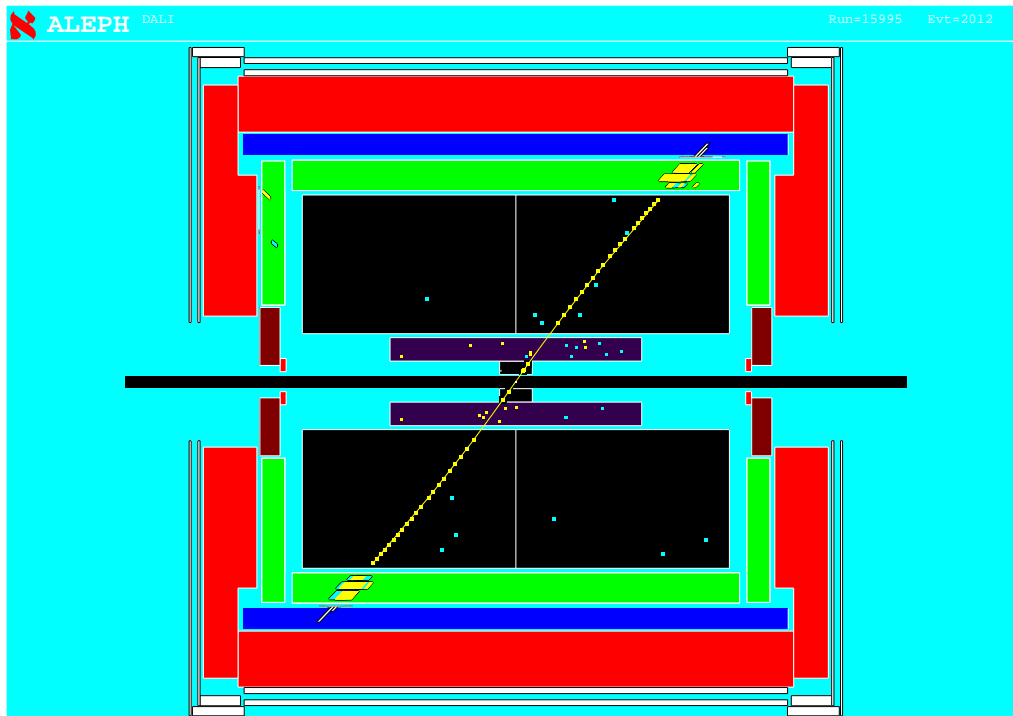


Abbildung 2: Ereignis 1 (ALEPH) in rz -Ansicht.

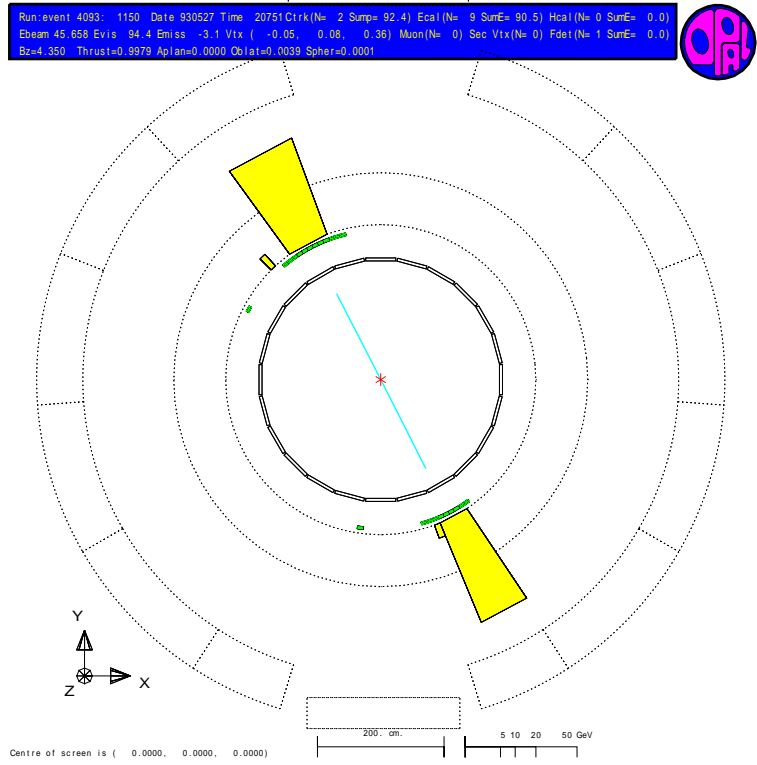


Abbildung 3: Ereignis 2 (OPAL).

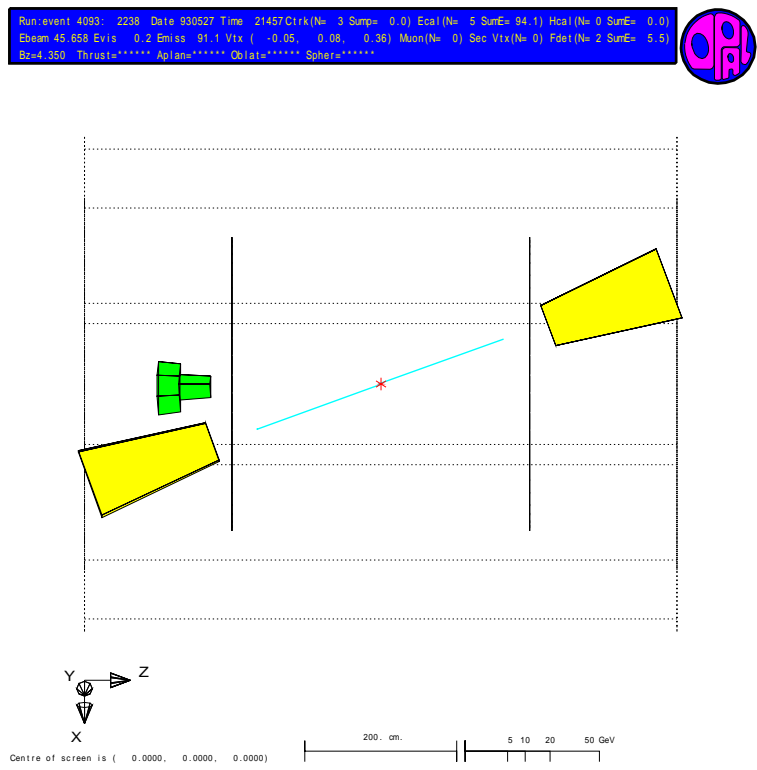


Abbildung 4: Ereignis 3 (OPAL).

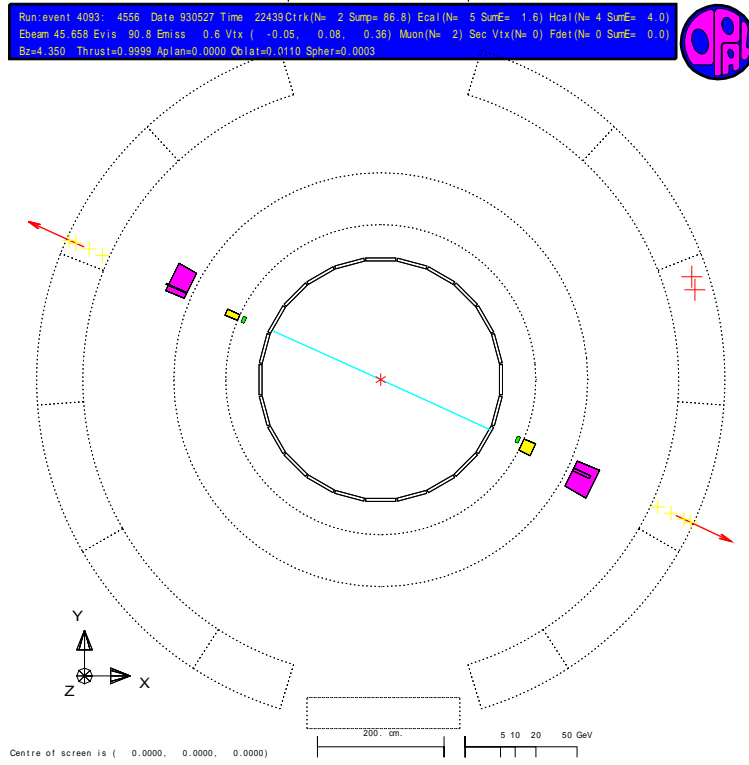


Abbildung 5: Ereignis 4 (OPAL).

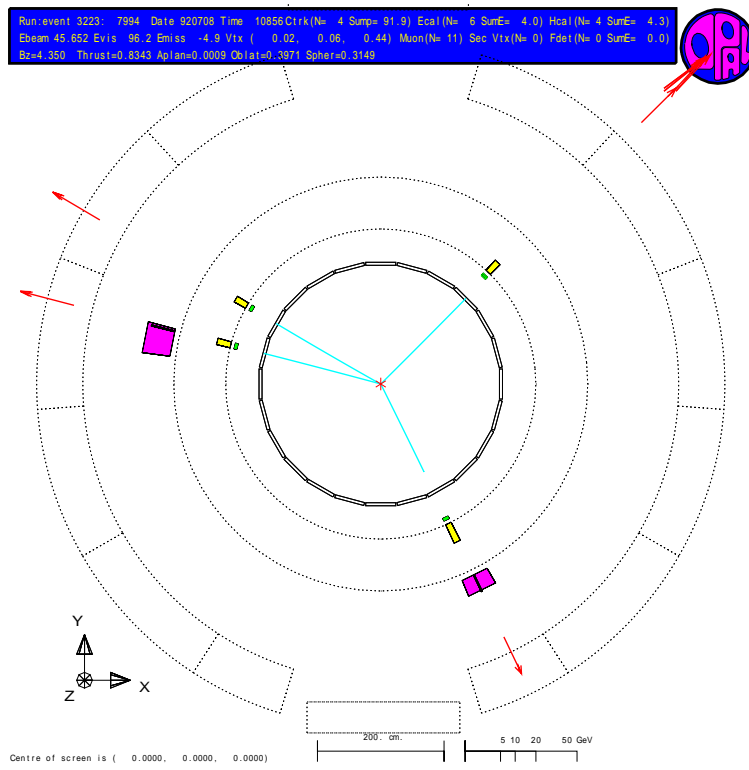


Abbildung 6: Ereignis 5 (OPAL).

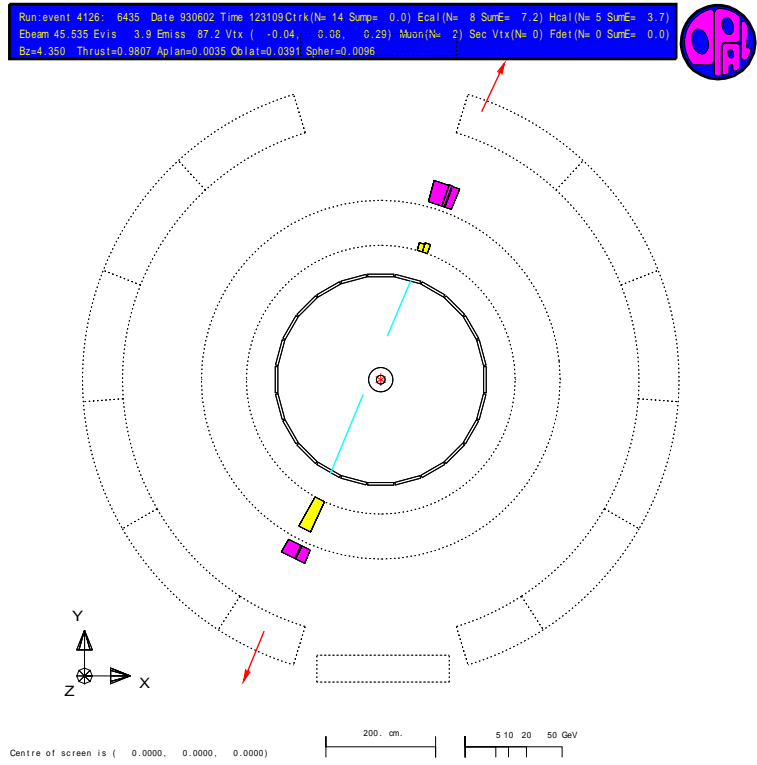


Abbildung 7: Ereignis 6 (OPAL).

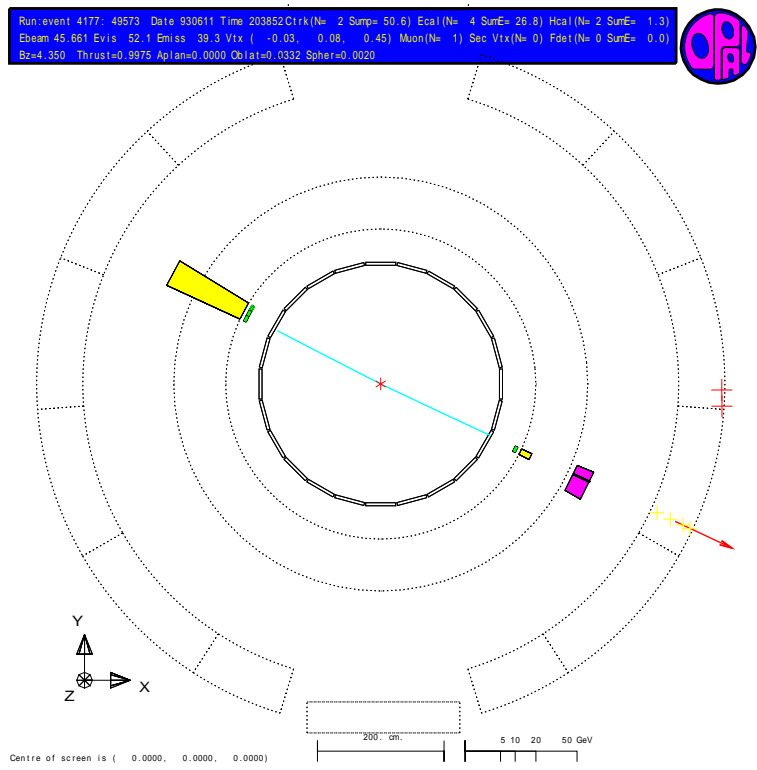


Abbildung 8: Ereignis 7 (OPAL).

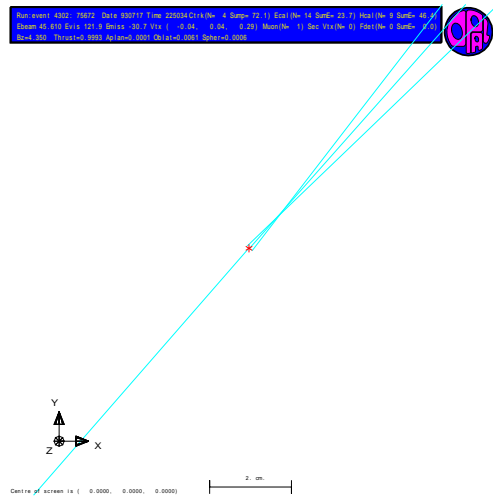
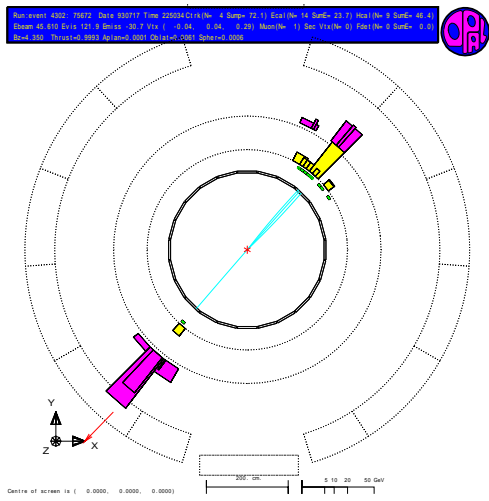


Abbildung 9: Ereignis 8 (OPAL).

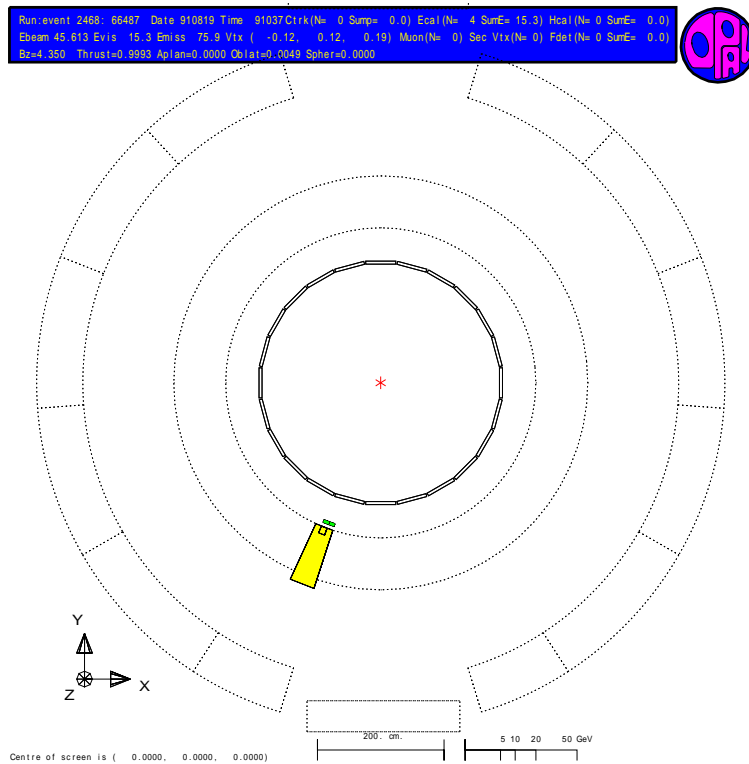


Abbildung 10: Ereignis 9 (OPAL).

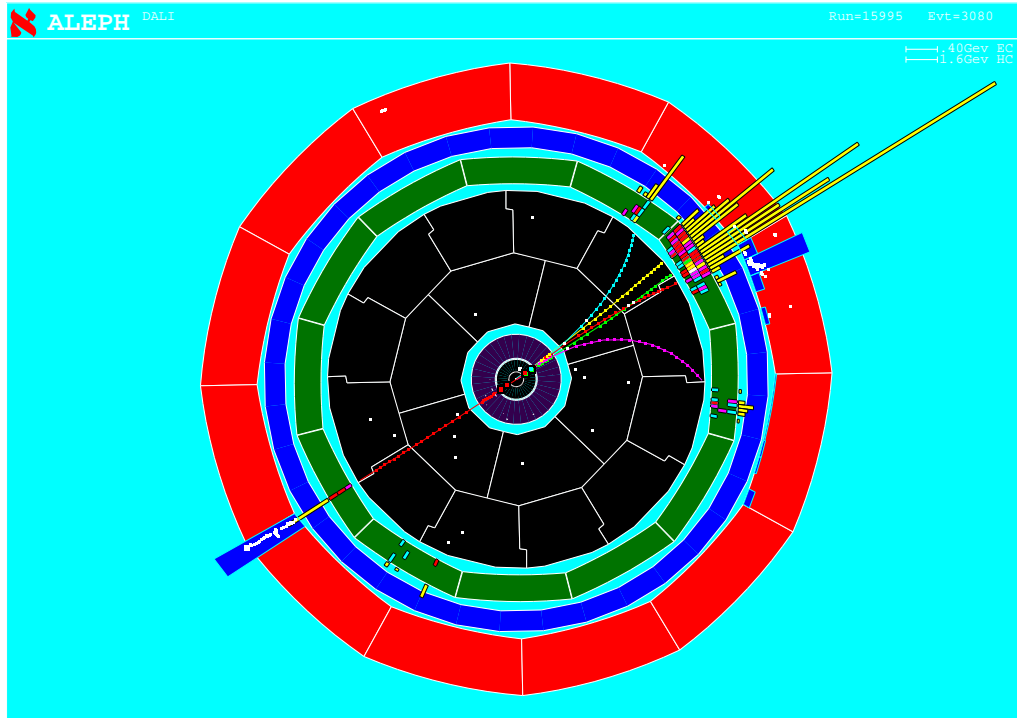


Abbildung 11: Ereignis 10 (ALEPH).

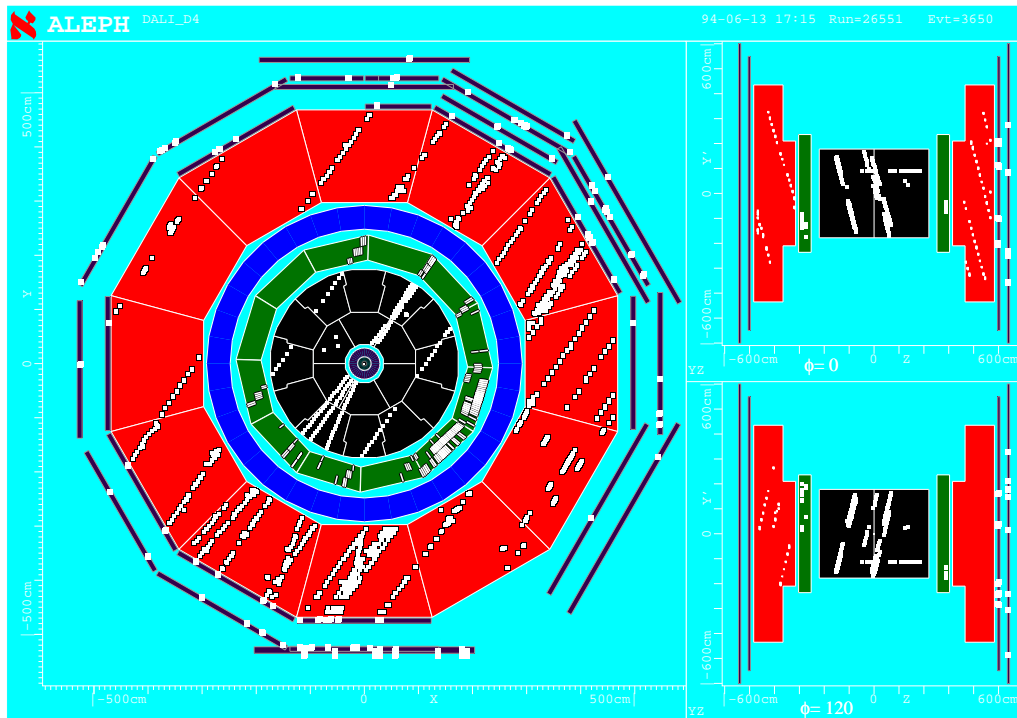


Abbildung 12: Ereignis 11 (ALEPH).

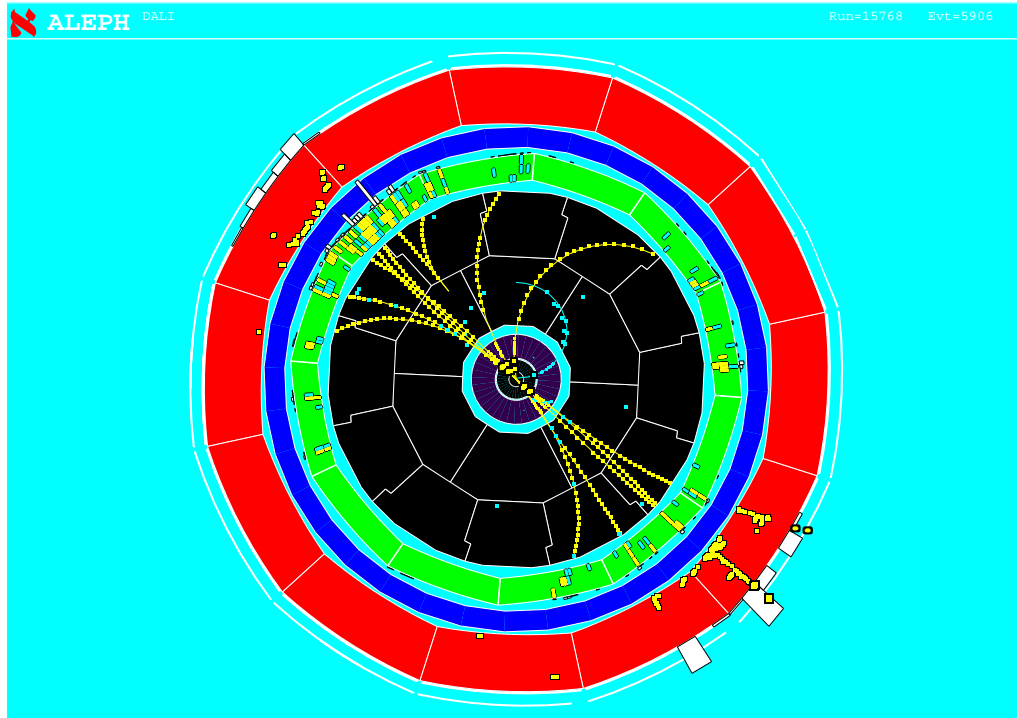


Abbildung 13: Ereignis 12 (ALEPH) in xy -Ansicht.

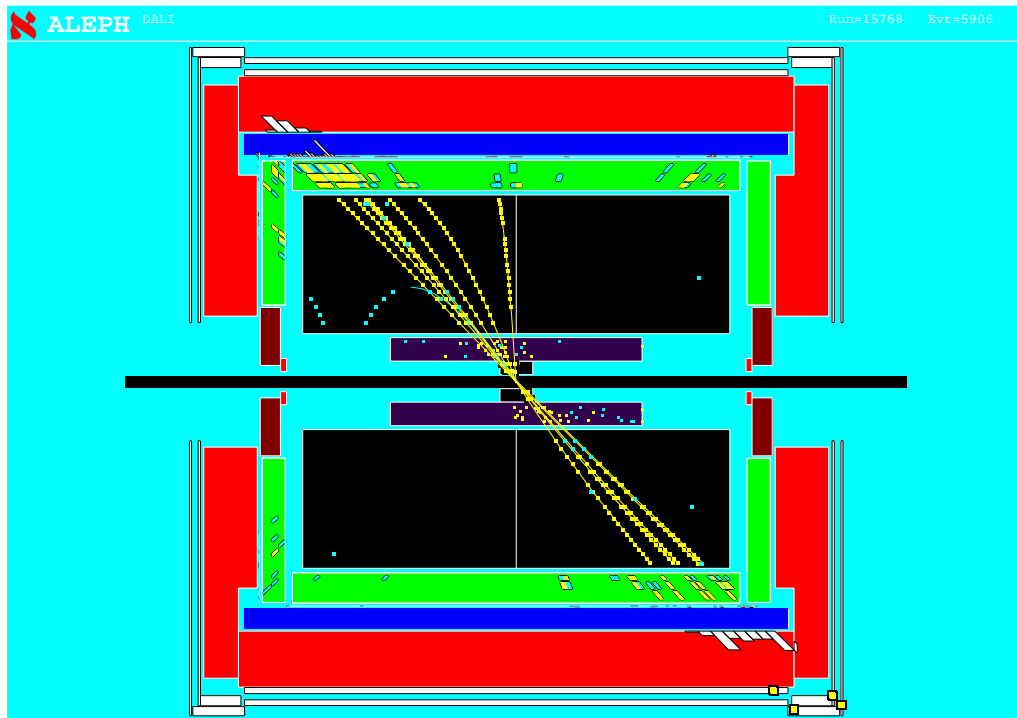


Abbildung 14: Ereignis 12 (ALEPH) in rz -Ansicht.

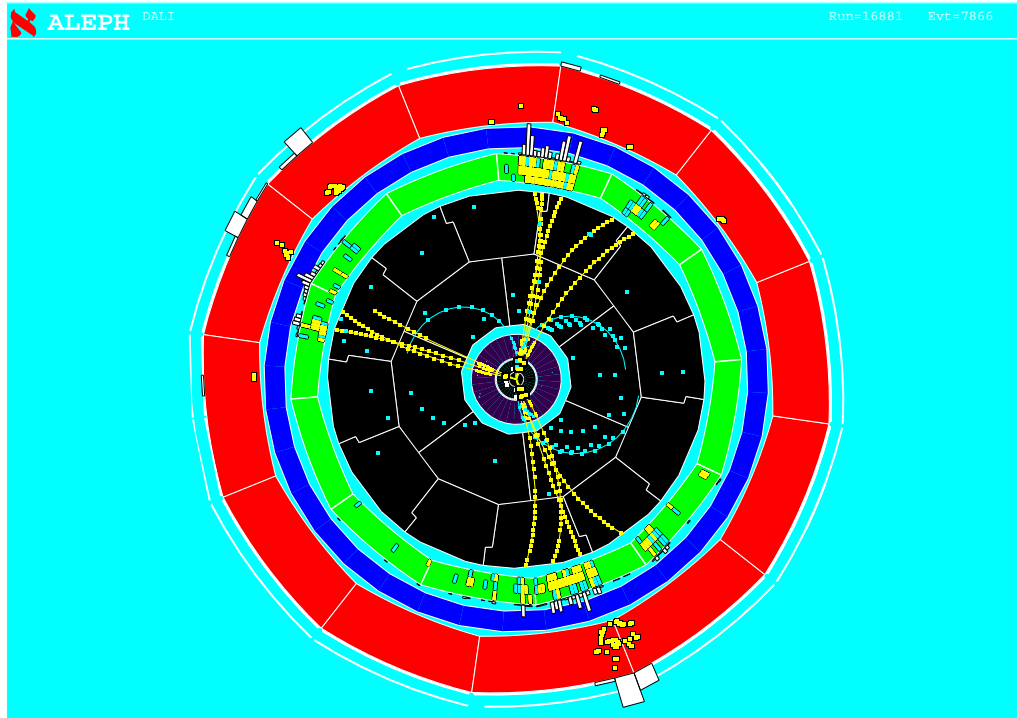


Abbildung 15: Ereignis 13 (ALEPH) in xy -Ansicht.

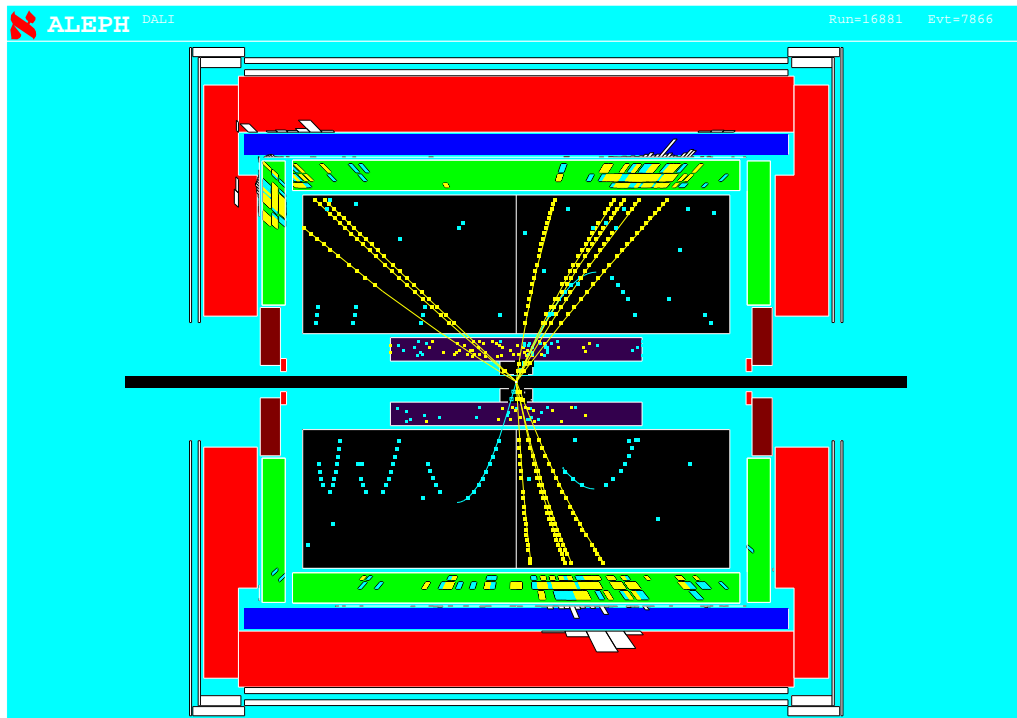


Abbildung 16: Ereignis 13 (ALEPH) in rz -Ansicht.

Run: event 7205, 903 Date 960709 Time 31619 Ctrk(N= 0 Surp= .0) Ecal(N= 8 SumE=154.6) Hcal(N= 3 SumE= 1.5)
 Ebeam 80.500 Evis 155.2 Emiss 5.8 Vtx (.00, .00, .00) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= .0)
 Bz=4.350 Bunchlet 1/1 Thrust= .9997 Aplan= .0000 Oblat= .0029 Spher= .0000

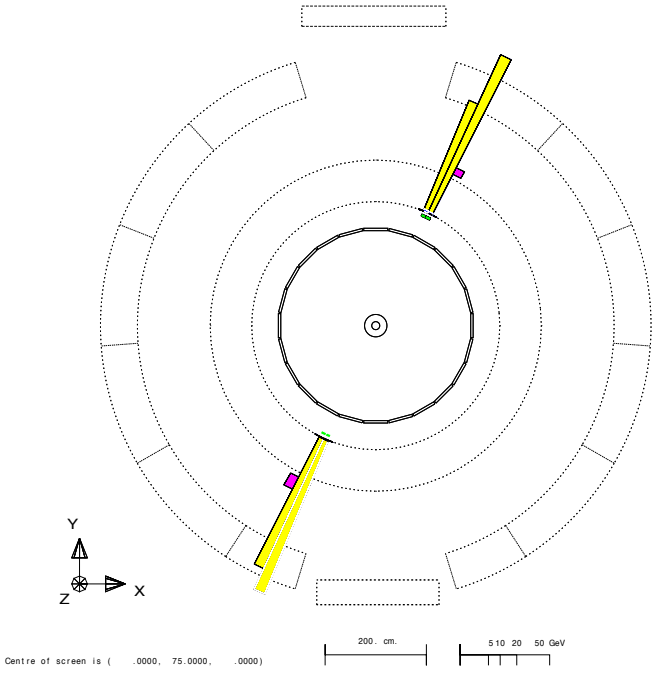


Abbildung 17: Ereignis 14 (OPAL).

Run: event 7220, 12469 Date 960711 Time 231618 Ctrk(N= 23 Surp= 29.5) Ecal(N= 19 SumE=129.4) Hcal(N= 6 SumE= 13.3)
 Ebeam 80.500 Evis 129.6 Emiss 32.4 Vtx (0.09, 0.00, 0.49) Muon(N= 1) Sec Vtx(N= 5) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 Bz=4.027 Bunchlet 1/1 Thrust=0.9955 Aplan=0.0002 Oblat=0.0118 Spher=0.0007

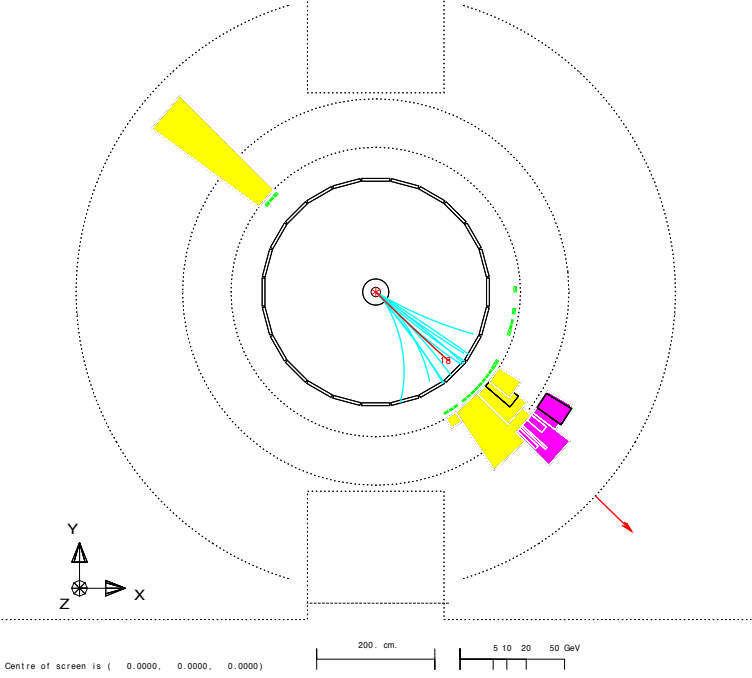


Abbildung 18: Ereignis 15 (OPAL).

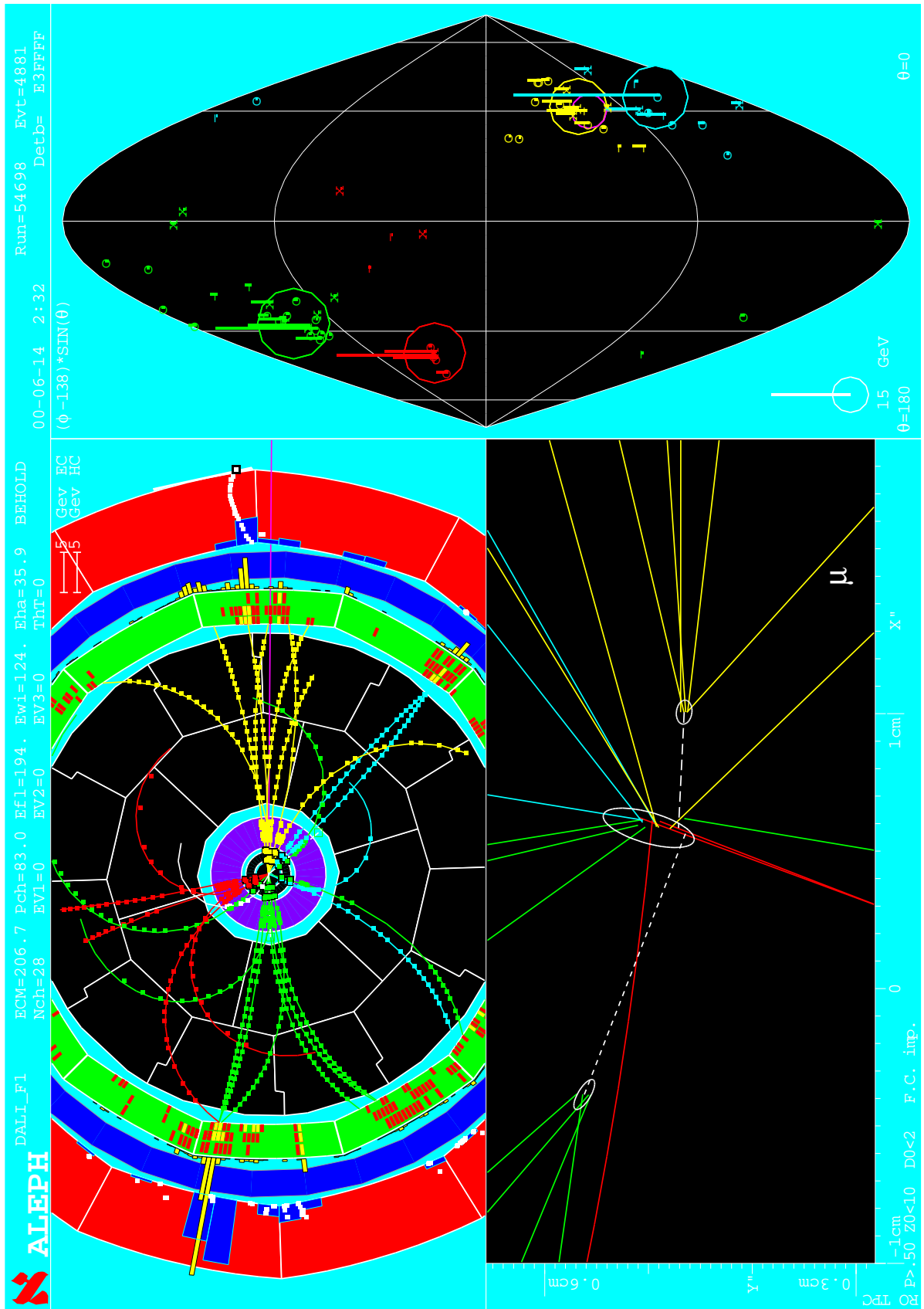


Abbildung 19: Ereignis 16 (ALEPH).