

1. Synchrotrons: from LEP to LHC

- a) The limiting factor for electron synchrotrons is synchrotron radiation, i.e. the radiation that the electron emits when it is being bent by the Lorentz force of the dipole magnets to remain on the orbit. The energy loss per orbit due to synchrotron radiation for a highly relativistic particle is given by

$$\Delta E = \left(\frac{4\pi}{3}\right) \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right) \frac{\beta^3\gamma^4}{R},$$

where R the radius of the collider, $\beta \approx 1$, and

$$\gamma = \frac{E}{mc^2}.$$

Synchrotron radiation at LEP caused most of the energy that was added to the beam in the RF cavities to be radiated off again, thereby setting an upper limit to its energy reach.

- b) There are two possible solutions to avoid the synchrotron radiation problem, as can be seen from the formula above. Either one uses heavier particles such as muons (200 times heavier than an electron) or protons (2000 times heavier than an electron). Since the energy loss due to synchrotron radiation drops as mass to the fourth power, muons (protons) would emit $10^8(10^{13})$ times less energy than electrons, at the same energy. An alternative solution is to increase the bending radius R , ultimately going to a linear collider design.
- c) At the LHC, synchrotron radiation is no longer a problem. The energy of the collider is fully determined by the bending power of the dipole magnets: (centrifugal force = Lorentz force)

$$E = e \cdot B \cdot c \cdot R$$

With $R = 3000\text{m}$, e the electric charge, and c the speed of light, one finds

$$E[\text{TeV}] \approx 0.84\text{B}[\text{Tesla}]$$

so for $B = 8.3\text{T}$, the maximal beam energy of the LHC is 7 TeV (i.e. 14 TeV centre-of-mass energy).

2. Luminosität am LEP

Die Formel für Luminosität am Speicherring ist:

$$\mathcal{L} = \frac{N_1 N_2}{A} f n$$

mit N_1, N_2 der Anzahl der Teilchen in den beiden Strahlen, f der Umlauffrequenz, n der Anzahl der bunches, sowie A der Querschnittsfläche des Strahls am Wechselwirkungspunkt. Die Fläche A berechnet sich als $A = 4\pi\sigma_x\sigma_y$. Mit Hilfe der Definition des Stroms $I_i = N_i e f n$ mit e der elektrischen Elementarladung erhält man für die Luminosität:

$$\mathcal{L} = \frac{I_1 I_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y e^2 f n}.$$

Die Umlauffrequenz berechnet man aus der Geschwindigkeit der Teilchen v sowie dem Umfang von LEP. Bei einer Energie von 103.4 GeV pro Teilchen kann man in guter Näherung als Geschwindigkeit die des Lichtes nehmen. Das ergibt eine Umlauffrequenz von

$$f = \frac{v}{d} = \frac{2.9979 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1}}{2.666 \cdot 10^4 \text{m}} = 11245 \text{Hz}.$$

Die restlichen Daten für die Berechnung der Luminosität sind (siehe Aufgabenstellung): die gemessenen Gesamtströme $I_{e^-} = 2498.1\mu\text{A}$, $I_{e^+} = 2497.5\mu\text{A}$, Anzahl der bunches $n = 4$, Grösse des Strahls $\sigma_x = 162 \pm 4\mu\text{m}$ (horizontal) und $\sigma_y = 24 \pm 6\mu\text{m}$ (vertikal), sowie elektrische Elementarladung $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{As}$. Damit erhält man als Luminosität:

$$\mathcal{L} = 11.06 \cdot 10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}.$$

Wie kommt nun die doch grosse Abweichung zum Resultat aus der Messung zustande? Die naheliegendste Vermutung muss sein, dass etwas an der Messung der Beamgrösse nicht so ganz stimmt. Alle anderen Werte sind unmittelbar bekannt, nur die Beamgrösse wird im nachhinein gemessen mit einer Methode, die notwendigerweise über längere Zeiträume integrieren muss, z.B. eine Stunde. In einer Stunde jedoch kann viel passieren. Fragt man einen Experten von der SPS+LEP Division am CERN, so erfährt man, dass der Strahl in vertikaler Richtung nur schwerlich an einer Stelle zu halten ist, und während des fills laufend korrigiert wird. Dies hat jedoch zur Folge, dass bei unserer Messmethode das Wackeln des Strahls mit in die Beamgrösse aufgenommen wird, und sich somit im Ergebnis niederschlägt.

Für Monte Carlo Simulationen wird übrigens als vertikale Beamgrösse $\sigma_y \approx 5\mu\text{m}$ genommen. Damit liegt das Rechenergebnis deutlich näher an der Messung. Die bestimmende Grösse bei der weiteren Auswertung jedoch ist das Messergebnis der Luminositätsmonitore.

Die integrierte Luminosität berechnet man als

$$\mathcal{L}_{int} = \int_0^t \mathcal{L} dt$$

mit t der verstrichenen Zeit $t = 2h \ 32min = 9120\text{s}$. Die Luminosität fällt linear ab auf 6.3% des Anfangswertes, die integrierte Luminosität ist folglich:

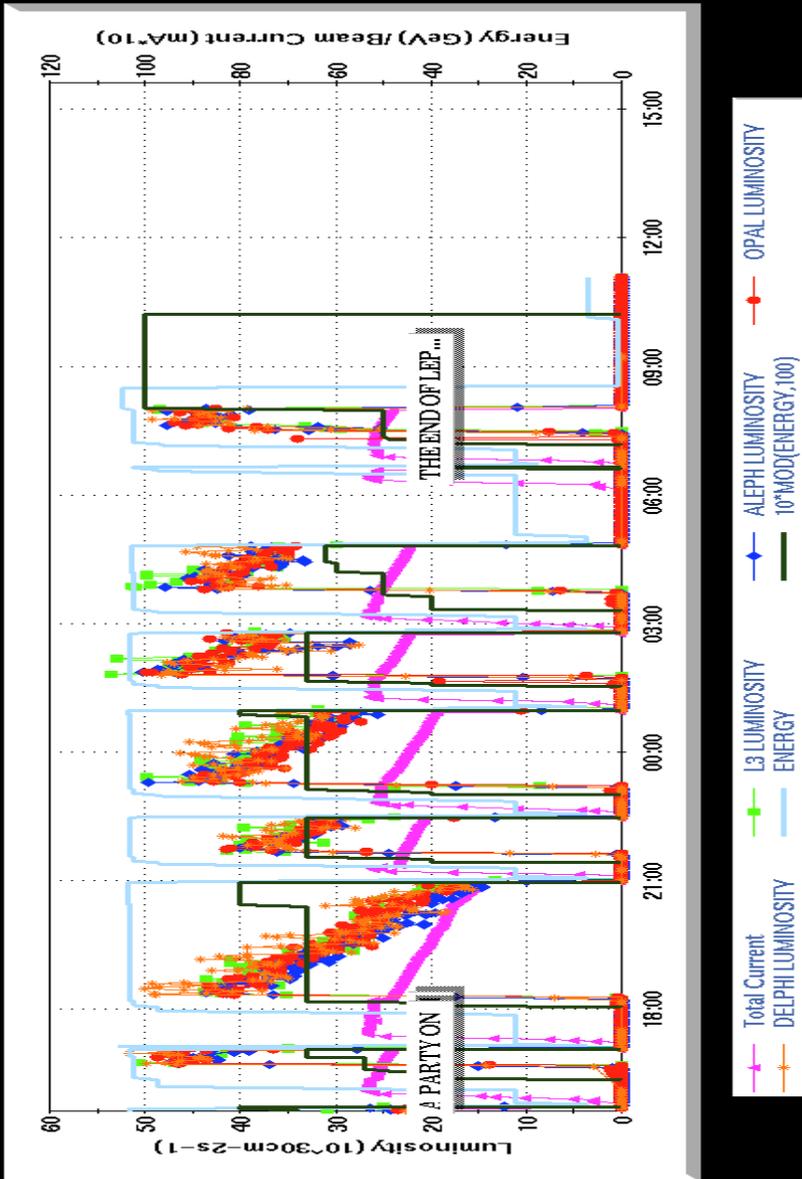
$$\mathcal{L}_{int} = \frac{1}{2}(\mathcal{L}_1 + \mathcal{L}_2) \cdot t = 2.57 \cdot 10^{35} \text{cm}^{-2} = 257 \text{nb}^{-1}.$$

Schliesslich erhält man für die Anzahl erwarteter Ereignisse vom Typ $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ bzw. $e^+e^- \rightarrow ZZ$:

$$N_{WW} = \mathcal{L}_{int} \cdot \sigma_{WW} = 0.257 \text{pb}^{-1} \cdot 17.3 \text{pb} = 4.4,$$

$$N_{ZZ} = \mathcal{L}_{int} \cdot \sigma_{ZZ} = 0.257 \text{pb}^{-1} \cdot 1.1 \text{pb} = 0.28.$$

We may not soar with the eagles but weasels dont get sucked into jet engines Thu Nov 2 11:05:25 2000



3. Abweichung von der Rutherford- und Mott-Streuung

- a) Der Rückstoss $E' - E$ kann vernachlässigt werden, wenn $E' \approx E$. $A = 196.97$
 Atomares Gewicht von Gold

$$u = 938 \text{ MeV} / c^2$$

$$E_{Au}^0 = m_{Au} c^2 = 184 \text{ GeV}$$

$$E' = \frac{E}{1 + E/E_{Au}^0 (1 - \cos(\Theta))} \geq \frac{137 \text{ MeV}}{1 + 2 * (137 \text{ MeV} / 184 \text{ GeV})} = 136.8 \text{ MeV} \approx E$$

⇒ Der Rückstoss ist vernachlässigbar.

- b) Der Effekt des Spins:

$$\frac{(d\sigma/d\Omega)_{Mott}^*}{(d\sigma/d\Omega)_{Rutherford}} = 1 - \beta^2 \sin^2 \frac{\Theta}{2}$$

$$\beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2} = \sqrt{1 - (0.511 \text{ MeV} / 137 \text{ MeV})^2} = 0.999993 \approx 1$$

$$\frac{(d\sigma/d\Omega)_{Mott}^*}{(d\sigma/d\Omega)_{Rutherford}} = 1 - \sin^2 \left(\frac{90^\circ}{2} \right) = 0.5$$

- c) Der observierte Wirkungsquerschnitt ist kleiner, weil der Kern nicht punktförmig sondern räumlich ausgedehnt ist.

4. Entdeckung des Positrons

- a) Warum handelt es sich bei den beobachteten Spuren nicht um Elektronen, und warum nicht um Protonen ?
 Elektronen nicht aufgrund der Krümmung, Protonen haben eine viel kürzere Reichweite in Luft.

- b) In welchem Prozess wurde nach Meinung der Autoren das zitierte Positron vermutlich produziert ?

Aus der Tatsache, dass Positronen in Gruppen auftreten, welche anderen Spuren zugeordnet werden, schliessen die Autoren, dass es sich um sekundäre Teilchen handelt, die aus Atomkernen ausgesandt werden. Die vermutete Reaktion ist: a.) Primärstrahl + Proton → Proton aufgebläht bis Elektronbahn + Sekundärphoton oder b.) Primärstrahl + Neutron → positives (negatives) Proton + ausgestossenes Elektron (Positron).

- c) Was für ein Typ von Detektor wurde benutzt ?

Wilson-Kammer (Cloud Chamber): Eine mit Gas gefüllte Kammer, eigentlich eine Mischung von Dampf in Gleichgewicht mit Flüssigkeit und einem nicht-kondensierenden Gas; durch Expansion wird die Mischung in einen übersättigten Zustand gebracht. Die Kondensation um die Ionen wird ausgelöst durch geladene Teilchen, die die Kammer durchqueren, die entstehenden Tropfen werden photographiert. (Quelle: Particle Detector Briefbook, <http://physics.web.cern.ch/Physics/ParticleDetector/BriefBook/>)

- d) Wie misst man die Energie, die ein Teilchen in der Blei-Platte verliert ?

Unterschied in der Krümmung vor und nach der Bleiplatte.

- e) Welche Energien hat das Positron von Figur 1 ?
 $63 \cdot 10^6 \text{ Volt} = 63 \text{ MeV}$ vor und $23 \cdot 10^6 \text{ Volt} = 23 \text{ MeV}$ nach der Bleiplatte.
- f) Woraus besteht nach der offenbar gängigen Meinung 1933 ein Neutron ?
Interessanterweise ist ein Neutron 1933 eine Verbindung aus Proton und Elektron. Falls sich jedoch herausstellen sollte, dass das Neutron ein Fundamentarteilchen ist, müsste man in Betracht ziehen, das Proton als eine Kombination aus Neutron und Positron zu sehen.
- g) Wozu diente das Experiment ursprünglich ?
Zum Photographieren von Spuren von kosmischen Strahlen.