Nel 1905, in un lavoro non direttamente collegato con quello sulla relatività, Einstein mostrò che nell'interazione con la materia la radiazione elettromagnetica si comporta come se fosse composta da granuli elementari (i "quanti di luce", poi chiamati fotoni) la cui energia è direttamente proporzionale alla frequenza della radiazione

$$E = h \nu$$

(h è la costante di Planck, che vale $6{,}64\ 10^{-34}$ J s)
Poiché per i fotoni è E = p c , la quantità di moto trasportata da un fotone è

$$p = h \nu / c = h / \lambda$$

Un fotone è un "corpuscolo" di massa nulla, che si muove sempre con velocità c, e possiede energia e quantità di moto

Effetto Doppler relativistico

Nel passaggio da un sistema S ad un altro S' la velocità della luce non cambia (c è invariante!) ma si osserva ugualmente una variazione della frequenza (effetto Doppler). Il calcolo della variazione di frequenza è immediato usando la legge di trasformazione per l'energia e le relazioni per i fotoni

$$E' = \gamma (E - u\,p) \qquad E = h\,\nu \qquad p = h\,\nu/c$$

Si ha

$$h\,\nu' = \gamma (h\,\nu - h\,\nu\,u/c)$$

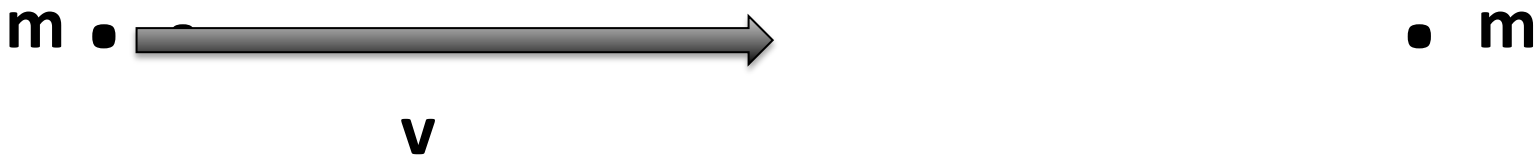
$$\nu' = \nu\,\gamma (1 - u/c) = \nu [(1 - u/c)/(1 + u/c)]^{1/2} = \nu [(c-u)/(c+u)]^{1/2}$$

Ovviamente le velocità vanno prese coi loro segni; se u è positiva l'osservatore in S' registra una frequenza minore, e viceversa. Come richiesto dal principio di relatività, non ha senso chiarire chi sta fermo e chi si muove (come nell'effetto Doppler acustico): conta solo la velocità relativa u

Collisioni (classiche) tra particelle

Consideriamo un urto completamente anelastico tra due masse uguali, osservato in due sistemi di riferimento

Sistema del laboratorio (SL): uno dei due corpi impatta con velocità v contro il secondo corpo fermo



Sistema del centro di massa (SCM): i due corpi si vengono incontro e urtano con velocità uguali e opposte

E' lo <u>stesso</u> urto: calcoliamo le energie in gioco nei due sistemi di riferimento

SL: a causa della conservazione della quantità di moto, dopo l'urto il blocco di massa 2m deve continuare a muoversi con velocità v/2

energia cinetica iniziale $\frac{1}{2} m v^2$

energia cinetica residua dopo l'urto $\frac{1}{2} (2m) (v/2)^2 = \frac{1}{4} m v^2$

energia dissipata nell'urto $\frac{1}{4} m v^2$

SCM: dopo l'urto il blocco di massa 2m resta fermo

energia cinetica iniziale $2 \frac{1}{2} m (v/2)^2 = \frac{1}{4} m v^2$

e tutta l'energia iniziale è dissipata nell'urto

Quindi, in un urto classico, nel sistema del laboratorio metà dell'energia iniziale se ne va in energia cinetica dopo l'urto, e solo metà viene consumata nella collisione (paghi due prendi uno), mentre nel sistema del centro di massa tutta la energia iniziale è disponibile nell'urto (paghi uno prendi uno)

Ma ad alte energie le cose cambiano radicalmente…

Chiamiamo E_{totL}, E_{totCM}, p_{totL} e p_{totCM} le energie e le quantità di moto totali, rispettivamente in SL e in SCM, e sia 1 il corpo inizialmente in moto in SL, mentre 2 è fermo

$E_{totL} = E_1 + mc^2$ (il corpo 2 ha solo energia di riposo mc^2)

$p_{totL} = p_1$ (il corpo 2 è fermo)

L'invariante relativistico è $E^2 - p^2c^2$, dunque

$$E_{totL}^2 - p_{totL}^2c^2 = E_{totCM}^2 - p_{totCM}^2c^2$$

$$(E_1 + mc^2)^2 - p_1^2c^2 = E_{totCM}^2 \quad (p_{totCM} = 0)$$

$$E_1^2 + m^2c^4 + 2\,E_1\,mc^2 - p_1^2c^2 = E_{totCM}^2$$

Poiché è $E_1^2 - p_1^2c^2 = m^2c^4$ si ottiene

$$2\,E_1\,mc^2 + 2\,m^2c^4 = 2\,mc^2\,(E_1 + mc^2) = 2\,mc^2\,E_{totL} = E_{totCM}^2$$

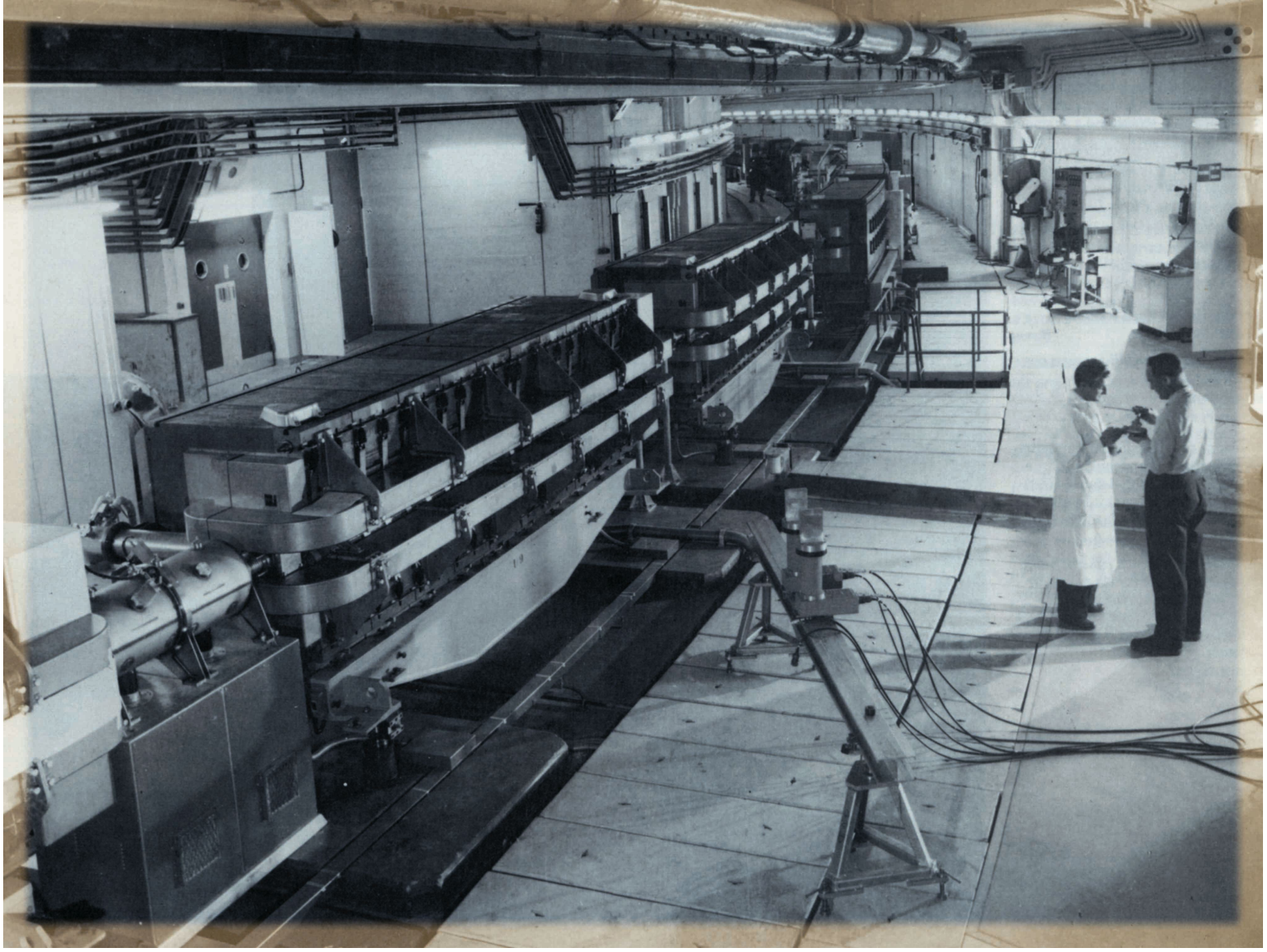
e in definitiva la relazione tra le energie totali è

$$E_{totL} = E_{totCM}^2/2\,mc^2$$

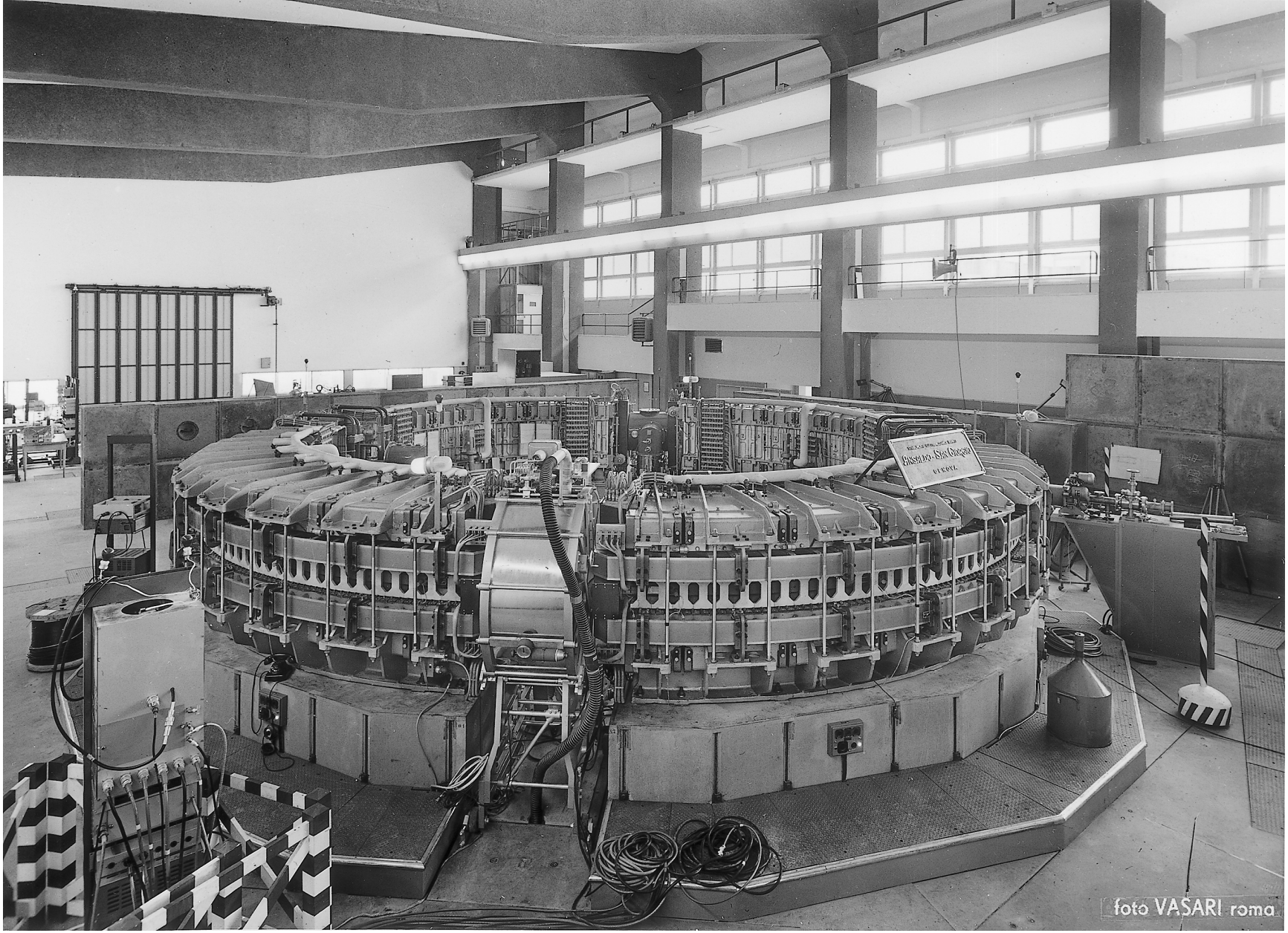
Esempio 1: il protosincrotrone del CERN di Ginevra (1959)
energia del fascio di protoni E_{lab} = 28 GeV
energia disponibile nel centro di massa ($mc^2 \cong 1$ GeV)
$E_{CM} \cong (28 \times 2)^{1/2} \cong$ 7,5 GeV (qui, paghi quattro e prendi uno)

La situazione è sempre peggiore al crescere dell'energia, ed è ancora più critica se si considerano urti tra particelle più leggere (elettroni)

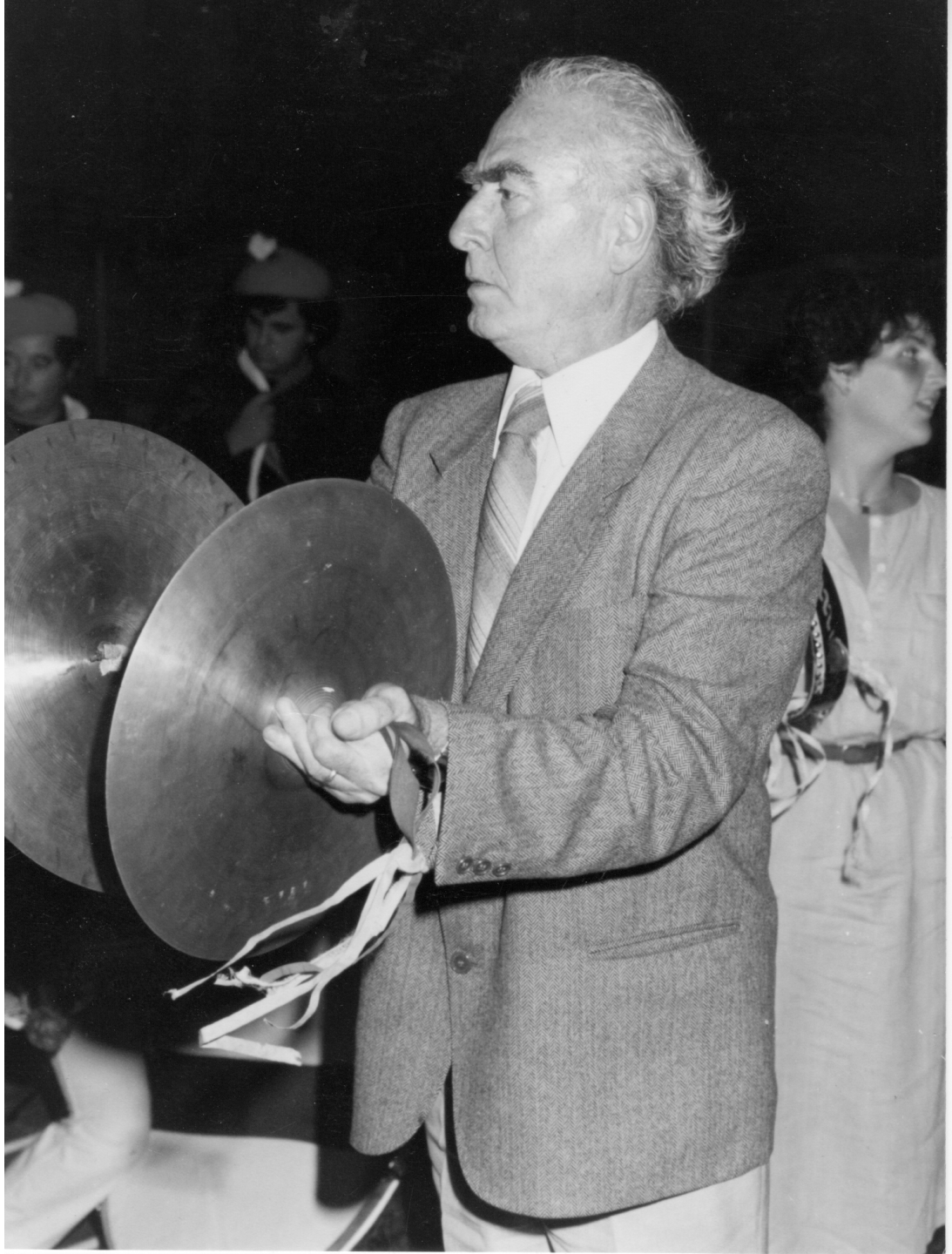
Esempio 2: l'elettrosincrotrone di Frascati (1959)
energia del fascio di elettroni $E_{lab} \cong 1$ Gev = 1000 MeV
energia disponibile nel centro di massa ($mc^2 \cong 0{,}5$ MeV)
$E_{CM} \cong (1000 \times 1)^{1/2} \cong 33$ MeV
Qui paghi trenta per prendere uno: francamente uno spreco eccessivo.



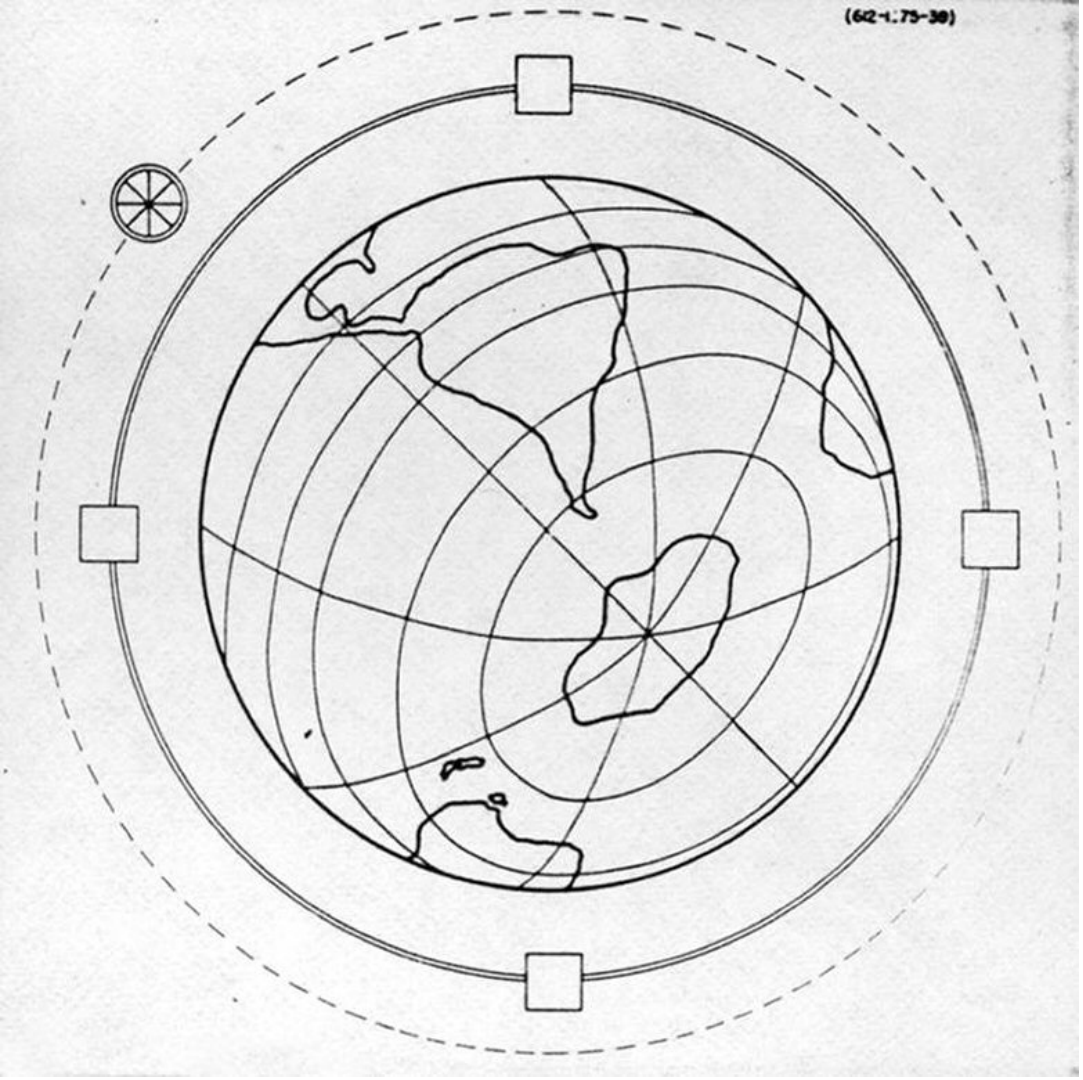
Una sezione dell'anello del protosincrotrone del laboratorio di Ginevra del CERN, entrato in funzione nel 1959, che accelerava protoni ad una energia di 28 GeV



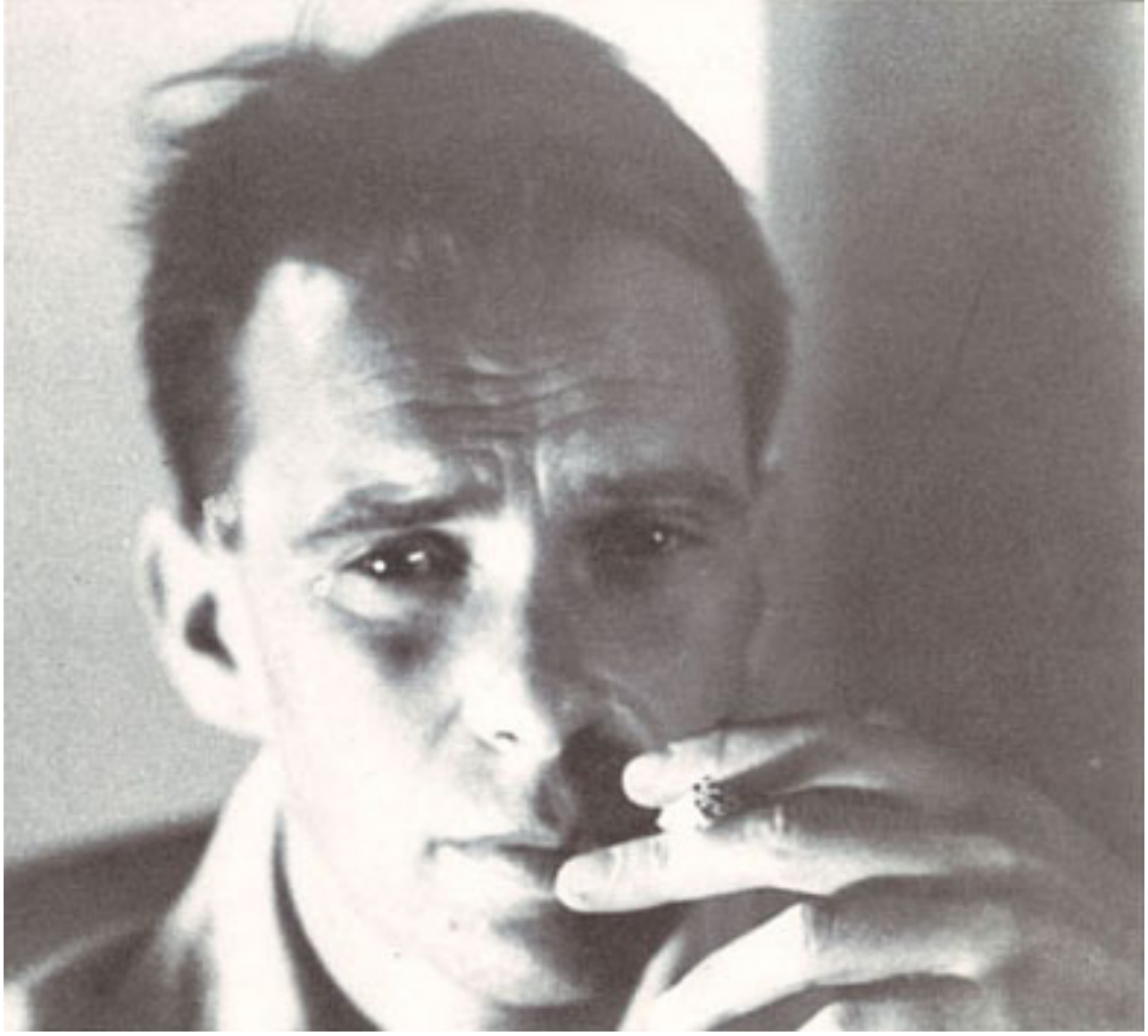
L’elettrosincrotrone da 1 GeV dei Laboratori nazionali di Frascati dell’Istituto nazionale di fisica nucleare (1959)



Giorgio Salvini, leader del gruppo dell'INFN che realizzò l'elettrosincrotrone di Frascati, tra il 1954 e il 1959



Il “Globatron”, l’acceleratore intorno al globo che Fermi immaginò nel 1954 come traguardo impossibile per arrivare a energie davvero elevate… a meno che non saltasse fuori qualche idea migliore

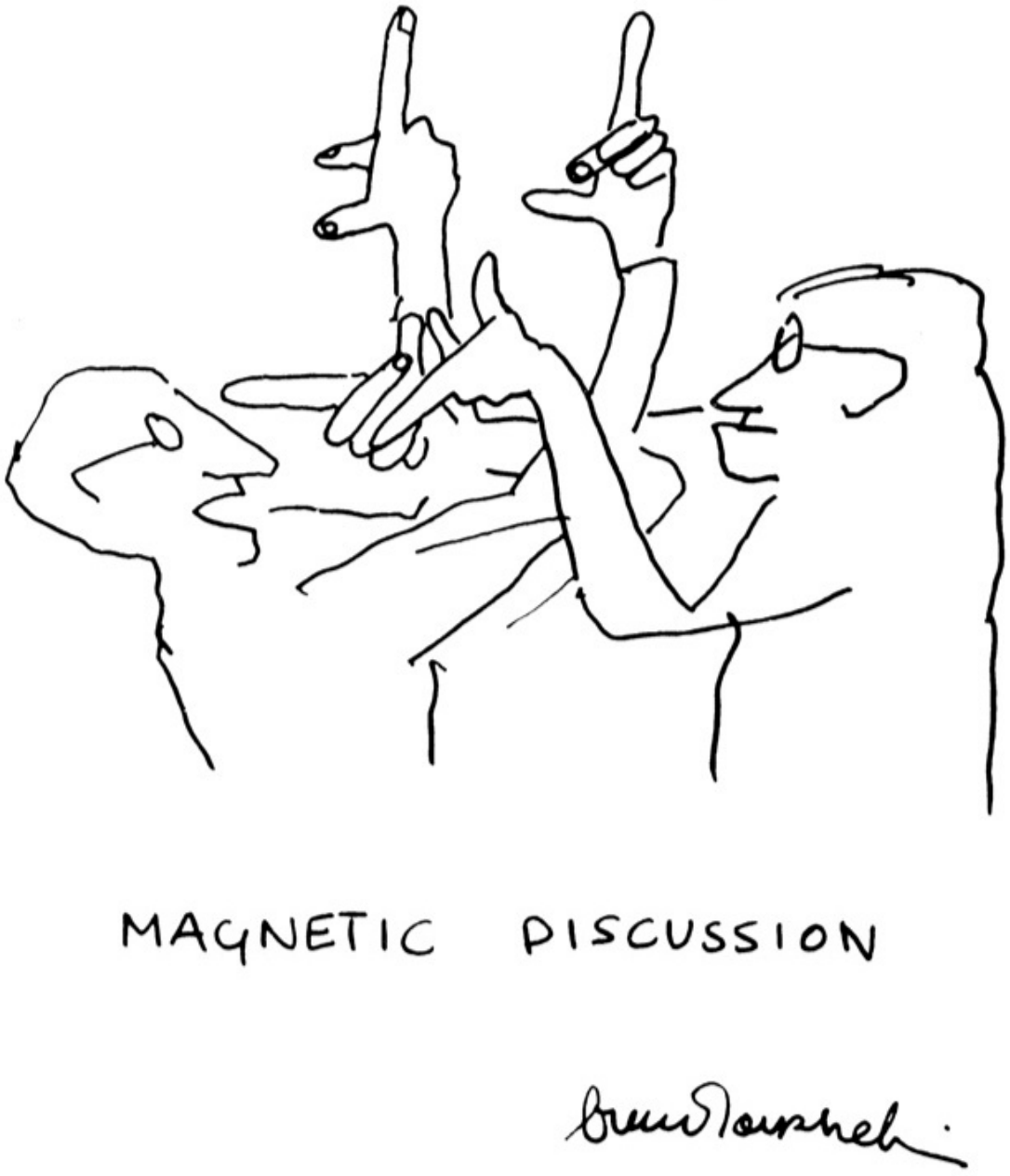


Bruno Touschek, il fisico di origine austriaca che nel 1960 a Frascati ebbe e concretizzò l'idea migliore: non più fasci di particelle sparate contro bersagli fissi, ma fasci contro fasci

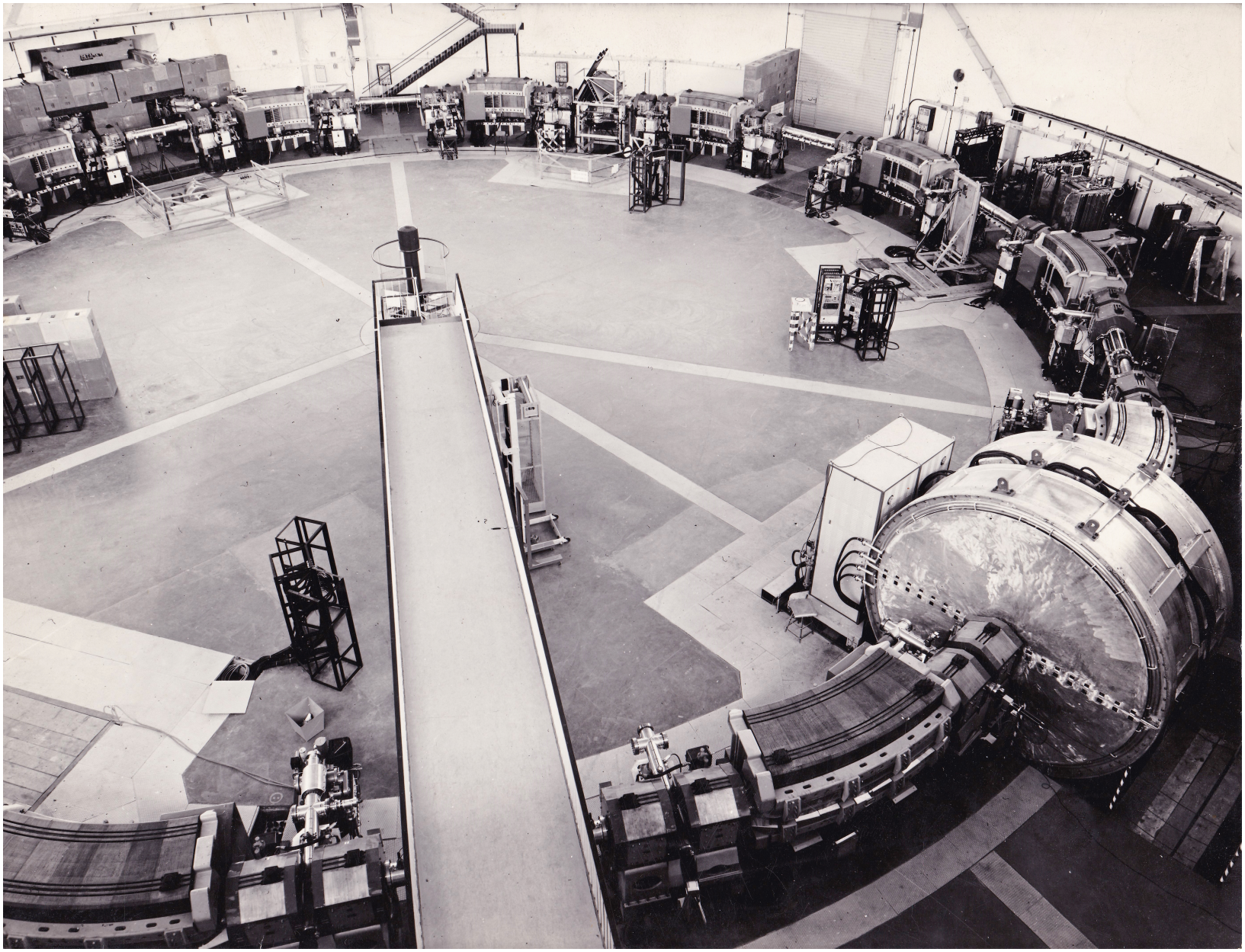
BRUNO TOUSCHEK

Frascati 1960

Ada (Anello di Accumulazione) per elettroni e positroni: neanche due metri di diametro, “solo” 250 MeV per fascio, ma tutti i 500 MeV disponibili nel centro di massa



da che parte girano, questi elettroni?



Adone, il fratello maggiore di AdA (1969): 1,5 GeV per fascio, per una energia di 3 GeV nel centro di massa