

LNF-72/114  
22 Dicembre 1972

F. Amman, M. Bassetti, A. Cattoni, V. Chimenti, D. Fabiani, M. Ma-  
tera, C. Pellegrini, M. Placidi, M. Preger, A. Renieri, S. Tazzari,  
F. Tazzioli e G. Vignola: ATTUALI STUDI SU SVILUPPI DI ANEL-  
LI A FASCI INCROCIATI. -

F. Amman, M. Bassetti, A. Cattoni, V. Chimenti, D. Fabiani, M. Matera, C. Pellegrini, M. Placidi, M. Preger, A. Renieri, S. Tazzari, F. Tazzioli e G. Vignola: ATTUALI STUDI SU SVILUPPI DI ANELLI A FASCI INCROCIATI. -

Relazione presentata da F. Amman al: "Convegno Scientifico dell'INFN" presso i Laboratori Nazionali di Frascati, 21-22 Novembre 1972.

L'interesse per gli anelli a fasci incrociati ha portato, negli ultimi anni, ad uno studio assai accurato della dinamica di fasci intensi e ad elevata densità, cui hanno contribuito fisici ed ingegneri di diversi laboratori; scopo di questa relazione è di presentare un quadro delle conoscenze attuali per quanto riguarda, soprattutto, gli anelli per elettroni e positroni e di trarne delle indicazioni per futuri sviluppi nel campo di energia tra 5 e 10 GeV.

#### 1. - SITUAZIONE DEGLI ANELLI DI ACCUMULAZIONE. -

Nella Tabella I sono elencati gli anelli di accumulazione per  $e^-e^-$  ed  $e^+e^-$ , già funzionanti o in fase di costruzione, nonché i valori massimi di luminosità per sezione sperimentale ottenuti o di progetto; a titoli di confronto sono riportati anche i dati degli ISR-CERN (anelli per pp).

I dati relativi a SPEAR vanno considerati provvisori, poichè l'anello è tutt'ora in fase di messa a punto; i risultati già ottenuti sono però estremamente importanti poichè dimostrano la possibilità di ottenere elevate luminosità con inserzioni a "low  $\beta$ ", il cui comportamento sembra essere sostanzialmente in accordo con le previsioni.

Per quanto riguarda ADONE vi è da dire che la luminosità potrebbe essere maggiore, se si potesse aumentare la corrente; quest'ultima è limitata, attualmente, dalle instabilità longitudinali di fascio singolo; sono in corso di realizzazione o in fase di progetto alcune modifiche che ne miglioreranno sia le prestazioni massime che la luminosità integrata:

a) sistema di pompaggio distribuito, per diminuire la pressione residua sia nelle sezioni sperimentali (minor fondo) che nel resto dell'anello (aumento della vita media dei fasci): è ora in via di montaggio su metà anello;

b) nuovo impianto a RF, a frequenza più elevata dell'attuale (cui corrisponde un fattore di riduzione della dimensione della sorgente all'incrocio pari a circa 2.5), con cavità migliori di quelle ora in funzione dal punto di vista delle instabilità longitudinali dei fasci e con potenza tale da permettere l'accumulazione di 150 mA per fascio alla massima energia, ciò che dovrebbe permettere un raddoppio della luminosità massima: l'impianto è in fase di studio e dovrebbe essere realizzato nel corso del 1973;

c) "low  $\beta$ " all'incrocio: il sistema, già provato ad 800 MeV, ha dato risultati la cui in

2.

interpretazione non è completamente soddisfacente: si proseguiranno le prove anche ad energie più elevate.

TABELLA I - Anelli di accumulazione in funzione e in costruzione - Luminosità massima.

	Energia massima GeV	Luminosità massima (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		Corrente(mA)
		ottenuta	di progetto	
e <sup>-</sup> e <sup>-</sup> - Stanford-Princeton	0.55	5x10 <sup>28</sup>	10 <sup>30</sup>	60+60
e <sup>+</sup> e <sup>-</sup> - VEPP-II	0.7	(1+2)x10 <sup>28</sup>		40+70
ACO	0.55	6x10 <sup>28</sup>		25+25
ADONE	1.5	6.5x10 <sup>29</sup>	2.8x10 <sup>29</sup>	75+75
CEA-Bypass	2.5(3)	(2+3)x10 <sup>28</sup>	10 <sup>31</sup>	
SPEAR	2.5(4.5)	2x10 <sup>30(x)</sup>	5x10 <sup>31</sup>	20+20
VEPP-III	3.5		10 <sup>31</sup>	
VEPP-II'	0.75		10 <sup>31</sup>	
DORIS	3(3.5)		10 <sup>32</sup>	
DCI	1.8		10 <sup>32</sup>	
pp. ISR-CERN	28	2x10 <sup>30</sup>	4x10 <sup>30</sup>	(7+9)x10 <sup>3</sup>

(x) - Risultati preliminari, luminosità massima a 1.5 GeV.

Il nuovo impianto a RF ed il pompaggio distribuito dovrebbero portare la luminosità media a circa 10<sup>30</sup> cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (nel range di energia 1.25 + 1.5 GeV); il "low β" dovrebbe dare un altro fattore circa due nello stesso range di energia ed un fattore forse maggiore ad energie minori (il fattore misurato a 800 MeV è circa due, ma, come si è già detto, l'interpretazione del risultato non è soddisfacente).

## 2. - LIMITAZIONI SULLA LUMINOSITA'.

La luminosità, in anelli per e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> o e<sup>-</sup>e<sup>-</sup> è data da:

$$(1) \quad L = \frac{c}{2r_e^2} h R \frac{i_w i_s}{S}$$

dove:

r<sub>e</sub> e c sono il raggio classico dell'elettrone e la velocità della luce;

h è il numero dei bunches per fascio;

R è il raggio medio dell'anello;

S è la sezione trasversa equivalente del fascio: nel caso di distribuzioni gaussiane ed incrocio ad angolo zero S = σ<sub>x</sub>σ<sub>z</sub>;

i<sub>w</sub>, i<sub>s</sub> sono le correnti per bunch dei fasci (rispettivamente debole e forte) in unità della corrente di Alfvén I<sub>0</sub> = ec/r<sub>e</sub> = 17.000 A.

Le limitazioni sulla luminosità possono derivare da:

a) limiti sulla densità trasversa per fascio i<sub>s</sub>/S;

- b) limiti sulla corrente per bunch  $i_s$ ;  
 c) limiti sulla corrente totale per fascio  $h i_s$ .

A loro volta i limiti su  $i_s/S$ ,  $i_s$  o  $h i_s$  possono essere dovuti all'interazione fascio-fascio, oppure alle instabilità di fascio singolo o infine alla potenza di radiofrequenza disponibile (che dà un limite sulla corrente totale per fascio in funzione dell'energia).

Vi è da notare che un limite sulla densità trasversa non dà, di per sé, un limite sulla luminosità, se la sezione trasversa del fascio  $S$  viene aumentata mantenendo costante la densità, ciò che può essere ottenuto ad esempio, ricorrendo all'incrocio ad angolo. Ai limiti su  $i_s$  o su  $h i_s$  corrispondono invece dei valori massimi ottenibili per  $L$ , funzioni di altri parametri dell'anello (in particolare della sezione  $S$ ).

Le forze che si esercitano tra due bunches all'incrocio provocano una variazione di frequenza dei vari modi di oscillazione delle particelle e, al tempo stesso, uno spread di frequenza che è dello stesso ordine di grandezza della massima variazione di frequenza; si avranno limiti trasversi o longitudinali in corrispondenza a forze trasverse (al moto delle particelle) o longitudinali.

La limitazione normalmente più stringente è sui modi trasversi, ed è una limitazione di densità:

$$(2) \quad \frac{i}{S} \leq \xi_m \left( \frac{H}{\beta} \right)_{x,z} \frac{\gamma}{R}$$

dove

$$- H_{x,z} = 1 + (\sigma_{x,z}) / (\sigma_{z,x});$$

-  $\beta$  è la lunghezza d'onda locale ridotta di betatrone nella zona di incrocio;

-  $\xi_m$  è la variazione massima ammissibile del numero d'onda di betatrone per incrocio, in approssimazione lineare.

Dalla (2) si vede che, per dati valori di  $\xi_m$ ,  $\gamma$  ed  $R$ ,  $i/S$  può essere aumentato diminuendo  $\beta$ : è la ragione per cui vengono adottate le speciali inserzioni a "low  $\beta$ " nelle quali si cerca di ottenere un valore di  $\beta$  dell'ordine di  $10 + 20$  cm contro il valore tipico di  $(3 + 20)$  m che si ha nel resto della macchina. Poiché l'andamento del  $\beta$  nella sezione dritta di incrocio in funzione della coordinata longitudinale  $y$  contata dal punto di simmetria, è del tipo:

$$(3) \quad \beta = \beta_0 + \frac{y^2}{\beta_0}$$

a valori molto bassi di  $\beta_0$ , corrispondono valori elevati del  $\beta$  agli estremi della sezione dritta e di conseguenza, particolare criticità degli elementi magnetici ivi posti; in generale poi, agli effetti della relazione (2), non serve rendere  $\beta_0 \lesssim 2 \sigma_y$  essendo  $\sigma_y$  la dimensione longitudinale r. m. s. del fascio (salvo che nel caso particolare di  $\beta$  eguali nelle due direzioni trasverse  $x$  e  $z$ ). Per queste ragioni si assume, in generale,  $\beta_0 \geq 2 \sigma_y$ .

L'eq. (2) mostra che, a parità di variazione di frequenza di betatrone  $\xi$ , al diminuire del  $\beta$  aumenta la densità trasversa dei fasci, e, di conseguenza, aumentano le forze dovute all'interazione fascio-fascio; occorre quindi controllare che le eventuali componenti longitudinali di tali forze non diano effetti catastrofici sul moto di sincrotrone.

Sono stati sinora studiati tre tipi di effetti longitudinali, che, nel caso di anelli  $e^+e^-$ , portano ad una diminuzione della frequenza di sincrotrone: il primo si ha nell'incrocio ad angolo<sup>(1)</sup>, e dà una limitazione di corrente per bunch (se le dimensioni del bunch sono quelle dovute all'irraggiamento); il secondo si ha quando, nella zona di incrocio, ci sia correlazione tra posizione ed energia delle particelle<sup>(2)</sup> (la funzione di orbita chiusa  $\psi$  è diversa da zero), e dà una limitazione di densità trasversa: il terzo è dovuto alla variazione di dimensione trasversa del fascio<sup>(3)</sup>, particolarmente pronunciata in un inserzione a "low  $\beta$ ", e dà una limitazione di corrente per bunch.

Manca, a tutt'oggi, un'analisi soddisfacente del moto delle particelle che tenga conto dei tre gradi di libertà e delle forze di accoppiamento tra essi, in presenza di una forte perturbazione localizzata e non lineare quale è l'interazione fascio-fascio. Ciò è tanto più importante quando si prendono in considerazione anelli di energia elevata, nei quali la frequenza di sincrotrone (in unità di frequenza di rotazione) non è più trascurabile rispetto alla parte non intera della frequenza di betatrone, e sono quindi possibili risonanze di accoppiamento sincrotrone-betatrone di ordine relativamente basso (poche unità). Basti pensare, a questo proposito, che l'accettanza longitudinale di un anello è dell'ordine di  $\sim 10^{-4}$  volte l'energia caratteristica associata alle oscillazioni trasverse; è quindi sufficiente un debole accoppiamento trasverso-longitudinale per portare alla perdita del fascio.

Questo argomento è attualmente allo studio; riteniamo comunque che i risultati sperimentali sinora ottenuti sui limiti trasversi difficilmente siano estrapolabili a macchine con elevati valori di frequenza di sincrotrone e, probabilmente, a macchine con incrocio ad angolo.

Ritornando brevemente ai limiti trasversi, la tabella II elenca i valori di  $\xi_m$  (vedi eq. (2)) misurati su vari anelli in funzione: essi sono distribuiti su un range abbastanza ampio, da  $1 \times 10^{-2}$  a  $8 \times 10^{-2}$ , e potrebbe sembrare assai arduo trarre una qualunque conclusione di carattere generale. Tenendo conto però che VEPP-II e gli anelli  $e^-e^-$  di Stanford-Princeton differiscono dagli altri per la probabile presenza di ioni positivi intrappolati nel fascio di  $e^-$ , nonché del fatto che il ACO  $\xi_m$  è limitato a 0.04 per la particolare scelta delle frequenze di betatrone (di poco inferiore all'intero), si può trarne l'indicazione che  $\xi_m = 0.08$  sia il valore massimo ottenibile, avendo ottimizzato tutti gli altri parametri.

TABELLA II - Valori massimi ottenuti per lo spostamento di frequenza di betatrone per incrocio  $\xi_m$ , dovuto all'effetto fascio-fascio.

Anello	n° di incroci	$\xi_m$
Stanf-Princeton	1	$\sim 10^{-2}$
VEPP-II	2	$\sim (0,5 \div 1) \times 10^{-2}$
ACO	2	0.04
ADONE	6	0.08
SPEAR	2	0.08
ISR-CERN	8	$\sim 4 \times 10^{-4}$

Calcoli numerici di Keil<sup>(4)</sup> danno per  $\xi_m$  il valore di  $0.07 + 0.08$  al limite di stocasticità, limite al quale le particelle dovrebbero subire una diffusione assai rapida, come conseguenza delle forti non linearità delle forze all'incrocio. Occorre aggiungere che, se al limite di stocasticità si ha certamente una diffusione assai rapida (e quindi allargamento o perdita di uno dei fasci), la dinamica nella regione di transizione al di sotto del limite di stocasticità non è stata analizzata: è probabile che per valori di  $\xi$  inferiori al valore massimo di  $0.07 + 0.08$  si abbia un processo di diffusione più lento che, nel caso di elettroni e positroni, va in competizione con lo smorzamento di radiazione (questa interpretazione è compatibile con tutti i risultati sperimentali, ed in particolare con quanto osservato su ADONE, che cioè per energie inferiori a  $900 + 1000$  MeV il valore massimo di  $\xi$  ottenuto è proporzionale a  $\gamma^{1.5}$ ). Di conseguenza i valori massimi di  $\xi$  per fasci di protoni (e quindi in assenza di smorzamento di radiazione) dovrebbero essere assai minori di quelli ottenuti con fasci di elettroni e positroni.

Un cenno al metodo della "compensazione di carica spaziale" adottato nell'anello DCI in costruzione ad Orsay: se invece che 2 fasci collidenti se ne hanno 4 di eguale intensità e di distribuzione spaziale, due di  $e^+$  e due di  $e^-$ , le forze fascio-fascio all'incrocio si annullano; per tener conto delle differenze di intensità e di distribuzione, nel progetto del DCI si assume di poter ottenere una densità all'incrocio corrispondente ad un valore del parametro  $\xi$  di circa 0.3. Il metodo è notevolmente complicato, richiede necessariamente due anelli in ciascuno dei quali circolano due fasci; vi sono inoltre dei dubbi che la configurazione dei quattro

fasci sovrapposti sia stabile, per moti coerenti, ad elevate densità<sup>(5)</sup>.

### 3. - FORMULE PER LA LUMINOSITA' E LA CORRENTE. -

Dall'eq. (1), introducendo il limite sulla densità trasversa (data dall'eq. (2)) e con la condizione aggiunta di non superare i limiti longitudinali (che, quando la sezione trasversa dei fasci è quella dovuta all'irraggiamento, hanno le stesse dipendenze funzionali e differiscono per fattori poco diversi dall'unità), si possono ottenere delle espressioni per la luminosità  $L$ , per la corrente per fascio  $I$  e per la luminosità specifica  $L/I$  in funzione dei parametri della macchina:

$$(4) \quad L = h \cdot 1,05 \times 10^{34} \xi_m^2 M \frac{E_{\text{GeV}}^4}{R\varrho} \frac{K \cdot K'}{\beta_z} \quad (\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1})$$

$$(5) \quad I = h \cdot 48,7 \xi_m M \frac{E_{\text{GeV}}^3}{R\varrho} K' \quad (\text{A})$$

$$(6) \quad L/I = 2,17 \times 10^{32} \xi_m E_{\text{GeV}} \frac{K}{\beta_z} \quad (\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{A}^{-1})$$

dove:

- $h$  è il numero di bunches per fascio;
- $R$  e  $\varrho$  (in m) sono rispettivamente il raggio medio dell'anello e il raggio di curvatura nei magneti;
- $\xi_m$  è la variazione di frequenza di betatrone ammissibile dovuta all'interazione fascio-fascio;
- $E$  (in GeV) è l'energia dei fasci;
- $\beta_z$  è il minore dei due  $\beta$  all'incrocio;
- $M$  (in m) è proporzionale all'invariante di betatrone, e dipende dalla struttura magnetica dell'anello<sup>(\*)</sup>; il valore di  $M$  quando i due fasci si incrociano può variare di un fattore dell'ordine di 2: nel seguito, per semplicità, si trascura questo effetto;
- $K, K'$  dipendono dal rapporto tra i  $\beta$  all'incrocio, dal valore della funzione di orbita chiusa all'incrocio  $\psi$  e dal rapporto delle dimensioni radiali e verticali del fascio;  $K$  può assumere un valore compreso tra 1 e 2,  $K'$  un valore compreso tra 0 e 1 (per  $\psi = 0$ ) oppure tra 0 e circa 3 ÷ 5 (per  $\psi \neq 0$ ).

L'esame delle eq. (4-6) permette di fare alcune considerazioni sulle grandezze caratteristiche di un anello di accumulazione per  $e^+e^-$ :

a) la luminosità specifica dipende solo da  $\xi_m$ , dall'energia e dal  $\beta$  (si è già detto che  $K$  può variare soltanto da 1 a 2): poichè si assume che  $\xi_m$  sia una costante (a condizione di evitare alcuni valori inopportuni degli altri parametri della macchina), risulta che piccoli valori di  $\beta$  sono assai vantaggiosi: assumendo  $\xi_m = 0,68$  (risultato sperimentale su ADONE e SPEAR),  $K = 1$  e  $\beta_z = 0,2$  m (ciò che richiede che  $\sigma_y \leq 10$  cm) si ha

$$L/I \simeq 0,9 \times 10^{32} E_{\text{GeV}} \quad (\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{A}^{-1});$$

b) la corrente  $I$  è proporzionale a  $E^3$ : se, al variare dell'energia, si vuole mantenere pressochè costante la luminosità occorre variare qualche altro parametro:  $h$  (il numero dei bunches),  $K'$  (che però non può assumere valori maggiori di circa 3 ÷ 5 in anelli di alta energia) o infine  $M$  (modificando la struttura foceggiante della macchina a seconda dell'energia di lavoro); assumendo, come valori tipici per un anello con  $E_{\text{max}} = 6$  GeV,  $R = 100$  m,  $\varrho = 32$  m,

(\*) -  $M$  è definito dalla relazione

$$M = \langle \gamma \psi^2 + 2\alpha \psi \psi' + \beta \psi'^2 \rangle \text{ magneti}$$

con le usuali notazioni di Courant e Snyder.

$M = 0.5 \text{ m}$ , si ottiene  $I = h \cdot 0.13 (E/E_{\text{max}})^3 K'(A)$ ;

c) all'energia massima si avrà, in generale, una limitazione sulla corrente massima per fascio dovuta alla potenza a RF installata: converrà quindi lavorare con un solo bunch per fascio ( $h=1$ ), mentre ad energie minori converrà lavorare con  $h > 1$ , evitando però che i fasci si incrocino al di fuori delle inserzioni a "low  $\beta$ ": si deve ricorrere quindi a due anelli separati, oppure alla separazione delle orbite nello stesso anello, al di fuori delle zone di incrocio, per mezzo di campi elettrici; le difficoltà ed il costo di due anelli distinti, nonché i problemi connessi con le instabilità longitudinali in presenza di molti bunches, rendono più conveniente un limitato numero di bunches ( $h$  da 3 a 10) ed una modifica del foccheggiamento che porti ad un aumento del valore di  $M$  nel lavoro a bassa energia.

Concludendo si può affermare che, dall'esame delle eq. 4-6, risulta possibile, sulla base dei dati sperimentali acquisiti su anelli funzionanti, e con una scelta opportuna della struttura magnetica dell'anello, realizzare un anello con energia massima tra 6 e 10 GeV, la cui luminosità sia compresa tra  $10^{31}$  e  $10^{32}$  ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) nell'intervallo di energia tra  $E_{\text{max}}$  e  $1/2 E_{\text{max}}$ , con correnti circolanti per fascio non superiori a  $(0.2 + 0.4)\text{A}$ , e comunque  $\leq 0.1 \text{ A}$  all'energia massima.

#### 4. - CRITERI DI PROGETTO DI UN ANELLO DI ACCUMULAZIONE PER $e^+e^-$ AD ALTA ENERGIA. -

I criteri di dimensionamento di un anello di elettroni per energia massima  $E_M$  maggiore di 3 + 4 GeV differiscono notevolmente da quelli normalmente usati per macchine per protoni, a causa dell'energia perduta per irraggiamento proporzionale a  $E^4/\rho$  (dove  $\rho$  è il raggio di curvatura nei magneti).

L'impianto a radiofrequenza ha un costo proporzionale a  $E_M^4/\rho$ , nell'ipotesi di poter mantenere costante, al variare dell'energia massima  $E_M$ , il campo elettrico accelerante medio di minimo costo (che risulta essere dell'ordine di 0.3 MV/m per frequenze comprese tra 50 e 100 Mc/s); vi sono poi dei costi proporzionali alla lunghezza dell'anello, e quindi al raggio di curvatura  $\rho$  (gli edifici e il sistema da vuoto); il costo del magnete può, con buona approssimazione, assumersi proporzionale ad  $E_M$  ed indipendente da  $\rho$  (la dipendenza di  $\rho$  è solo attraverso il prodotto  $\rho B \propto E$ ): in realtà il costo del magnete tende ad aumentare lievemente al diminuire di  $\rho$ , a parità di energia. Combinando questi elementi si ottiene il minimo costo per

$$(7) \quad \rho = b E_M^2$$

Per valori di  $E_M \gtrsim 3 \text{ GeV}$  la costante  $b$  calcolata assumendo caratteristiche e costi unitari per la RF propri di una frequenza intorno ai 100 Mc/s, una corrente per fascio all'energia massima di 100 mA e, per l'edilizia, costi relativi ad un edificio anulare con sezione trasversa ridotta ( $4 \times 4 \text{ m}^2$ ), opportunamente schermato, risulta essere circa  $0.8 + 0.9 \text{ m/GeV}^2$ ; per il rapporto tra raggio medio dell'anello e raggio di curvatura si è assunto il valore 3.

Al variare dell'energia massima dell'anello  $E_M$ , scalando il raggio di curvatura (e quindi anche il raggio medio) con il quadrato dell'energia, il costo degli impianti a radiofrequenza, dell'edilizia e del sistema da vuoto saranno proporzionali a  $E_M^2$ , il costo del magnete sarà proporzionale a  $E_M$  ed altri costi (controlli, sale sperimentali, impianti convenzionali, canali magnetici per l'iniezione) saranno funzioni crescenti di  $E_M$ , più lente di una legge lineare. Anche l'energia irraggiata per giro all'energia massima (e quindi la tensione di radiofrequenza) sarà, con questa ipotesi, proporzionale a  $E_M^2$ : per  $E_M = 6 \text{ GeV}$  e  $\rho = 32 \text{ m}$  si ha una perdita di energia di 3.6 MeV/giro, e la tensione totale di RF (a frequenza minore od eguale a 100 Mc/s) dev'essere di 5.4 MeV/giro; per  $E_M = 10 \text{ GeV}$  e  $\rho = 89 \text{ m}$  la perdita di energia per giro sale a 10 MeV/giro e la tensione totale di RF a 15 MeV/giro. La lunghezza totale delle cavità a RF risulta nei due casi rispettivamente di 18 m e 50 m (18 cavità da 1 m ciascuna e 50 cavità da 1 m ciascuna).

La scelta della frequenza di lavoro della RF richiede un'analisi accurata; vi sono però molti elementi a vantaggio di una frequenza relativamente bassa (50 + 100 Mc/s), e cioè bas

sa frequenza di sincrotrone, minore tensione massima, minori problemi di iniezione di un bunch singolo; gli svantaggi della bassa frequenza sono: maggior lunghezza del bunch ( $\sigma_y \propto (f_{RF})^{-1/2}$ ), minore impedenza shunt delle cavità. Da un esame preliminare sembra però che una frequenza intorno ai 100 Mc/s sia abbastanza prossima all'ottimo.

Un 'altro elemento che richiede uno studio accurato è l'inserzione a "low  $\beta$ ", alla quale si richiede la massima flessibilità nella scelta dei  $\beta$  e della  $\psi$  all'incrocio: se si riesce a ridurre la lunghezza può essere diminuito il rapporto  $R/\rho$ , e quindi il costo dell'anello; vanno inoltre evitati, se possibile, valori troppo elevati di  $\beta$  negli elementi magnetici dell'inserzione, che imporrebbero delle tolleranze assai stringenti sulle proprietà degli stessi elementi. Si sta esaminando una soluzione diversa da quelle adottate sinora, e che consiste nell'avere una sezione diritta completamente libera relativamente corta (3 metri) agli estremi della quale vi sono dei quadrupoli di dimensioni trasversali ridotte, tali da poter essere inglobati negli apparati sperimentali; si pensa inoltre di avere un valore minimo di  $\beta$  dell'ordine di 20 cm in verticale e di circa 1 m in orizzontale. Queste scelte rendono assai meno critica l'inserzione e, al tempo stesso, ne riducono le dimensioni longitudinali.

#### 5. - L'ACCUMULAZIONE E L'INIETTORE. -

L'accumulazione di due fascio ad un'energia molto inferiore all'energia di utilizzazione pone grossi problemi che possono essere divisi in due categorie:

a) instabilità di fascio singolo: all'energia di iniezione occorre accumulare una corrente assai più elevata della soglia delle instabilità di fascio singolo a quella energia (in ADONE la corrente che si deve accumulare per l'operazione ad alta energia è circa 50 volte superiore ai valori di soglia delle instabilità di fascio singolo all'energia d'iniezione);

b) effetto fascio-fascio: l'eq. 5 mostra che la corrente massima ammissibile all'incrocio è  $\propto E^3$ ; per poter accumulare all'energia di iniezione la corrente richiesta per l'operazione ad un'energia più elevata occorre separare i fasci, e la separazione deve essere tanto maggiore quanto maggiore è il rapporto tra l'energia massima di lavoro e l'energia d'iniezione; nel caso di inserzioni a "low  $\beta$ " il problema si complica ulteriormente, perchè, in generale, il fascio iniettato ha una lunghezza assai maggiore delle sue dimensioni a regime, e quindi l'incrocio temporale può avvenire in zone di  $\beta$  assai elevato (vedi eq. (8)).

Un modo sicuro di evitare tutte queste difficoltà è di accumulare i fasci all'energia massima, o ad un'energia assai vicina a quella massima, anche se ciò significa complicare il sistema di iniezione: occorre però avere un iniettore ad alta energia, oppure aggiungere un sincrotrone booster.

Delle due classi di problemi più sopra menzionate quella che va esaminata con maggiore attenzione è senz'altro la seconda, e cioè l'effetto fascio-fascio (forse non è fuori di luogo notare che una delle difficoltà incontrate a SPEAR, e cioè la saturazione nell'accumulazione dei due fasci, sembra dovuta all'interazione tra i due fasci separati in zone dove il valore di  $\beta$  è assai maggiore di quello che si ha nel centro della sezione diritta di incrocio). Si può calcolare la variazione di frequenza di betatrone dovuta all'incrocio (temporale) tra due fasci, separati di una distanza  $2a$ , nell'ipotesi di dimensioni trasverse proprie trascurabili rispetto ad  $a$  e di assenza delle pareti:

$$(8) \quad \xi_{\text{sep}} = - \frac{I/h}{I_0} \frac{R\beta}{\gamma(2a)^2}$$

la presenza delle pareti introduce un fattore correttivo a moltiplicare  $K \simeq 1 + 3$ ; il segno meno sta ad indicare che, nel caso di  $e^+e^-$ , l'incrocio temporale di fasci separati dà una diminuzione di frequenza di betatrone. Per  $I/h = 0.2$  A,  $R = 100$  m,  $\beta = 50$  m,  $\gamma = 3000$  ( $E=1.5$  GeV),  $K = 2$ , la separazione richiesta perchè  $\xi_{\text{sep}} = 0.01$  è:

$$(9) \quad 2a = \left\{ K \frac{I/h}{I_0} \frac{R\beta}{|\xi_{\text{sep}}|\gamma} \right\}^{1/2} = 5.4 \text{ cm}$$



(il massimo valore ammissibile di  $\xi_{sep}$  è assai minore di quello più sopra considerato per l'incrocio di due fasci sovrapposti; ciò corrisponde ad osservazioni sperimentali su ADONE ed è anche dovuto al fatto che valori maggiori di  $\xi_{sep}$ , pur senza portare alla perdita dei fasci, riducono assai il rendimento di iniezione).

Consideriamo ora il tempo di iniezione necessario per accumulare 0.2 A in un anello di raggio medio 100 m, facendo l'ipotesi di accumulare sino a 100 mA in ADONE, accelerare questo fascio a 1.5 GeV e poi trasferirlo nell'anello maggiore; a parità di carica accelerata, le correnti stanno nel rapporto inverso dei raggi medi, quindi 100 mA in ADONE corrispondono a 16.7 mA nell'anello maggiore.

Il miglior valore di velocità di iniezione ottenuto sinora in ADONE è di  $(25 \div 30)$  mA/1'; supponiamo di poter mantenere una velocità di iniezione di 15 mA/1' su tre bunches col nuovo impianto di RF a 50 Mc/sec: occorreranno quindi 6.6' per accumulare 100 mA. Tenendo conto del tempo di accelerazione in ADONE, ogni 8' si potranno trasferire 16.7 mA di  $e^+$  nell'anello principale, e quindi occorreranno circa 100' per accumulare 200 mA in un anello di raggio 100 m; il tempo raddoppia per un anello con raggio doppio, a parità di corrente. I tempi non cambiano se invece di accumulare 200 mA in un solo bunch, la stessa corrente viene suddivisa in più bunches nell'anello principale.

Una velocità media di accumulazione degli  $e^+$  di 2 mA/1' (o 1 mA/1' per  $R = 200$  m) è troppo bassa; si può pensare di aumentarla in due modi: aggiungendo due sezioni acceleratrici al linac, portando l'energia del fascio di  $e^+$  a 400 MeV, oppure accumulando in ADONE sei bunches invece che tre. In ambedue i casi si ha un raddoppio della velocità di iniezione in ADONE, e quindi un raddoppio della velocità media di accumulazione degli  $e^+$  nell'anello principale.

Concludendo si può dire che l'iniezione e accumulazione di due fasci di 0.2 A ciascuno in un anello di circa 100 m di raggio medio (corrispondente ad un'energia massima di 6 GeV) è possibile sfruttando ADONE come booster, e non richiede modifiche di rilievo al linac e ad ADONE o un'apertura proibitiva nell'anello principale; è però marginale, ed un aumento della corrente e/o del raggio medio dell'anello potrebbero imporre soluzioni diverse, e più complesse.

#### 6. - DATI DI MASSIMA DI UN ANELLO CON ENERGIA MASSIMA DI 6 GeV. -

A titolo di esempio nella Tabella III sono riportate le caratteristiche principali di un anello per  $e^+e^-$  con energia massima di 6 GeV, raggio medio  $R = 100$  m e raggio di curvatura  $\rho = 32$  m; a titolo di confronto sono riportate anche le caratteristiche di ADONE.

TABELLA III - Specifiche di massima di un anello di energia massima 6 GeV: confronto con ADONE.

		ADONE
Energia massima (GeV)	6	1.5
Corrente per $E = E_M$ (mA)	$2 \times 100$	$2 \times 100$
Corrente massima (mA)	$2 \times 200$	$2 \times 100$
Perdita d'energia per giro $E=E_M$ (MeV/giro)	3.6	0.09
Tensione massima di RF (MV/giro)	5.4	0.14
Potenza max trasferita ai fasci (kW)	720	18
Potenza max totale RF (kW)	1.120	40
Lungh. totale cavità RF (m)	20	4
Peso struttura magnetica (ton)	$\sim 750$	350
Potenza aliment. magneti (MW)	$\sim 4.5$	1.2
Energia di iniezione (GeV)	1.5	0.32
Cost. di smorz. all'energia di iniez. (sec)	0.45	1
Tempo per accumul. 0.2 A $e^+$ (minuti)	$\sim 50'$	$\sim 7'$

Dal confronto risulta immediatamente che la maggiore differenza sta nell'impianto a

radiofrequenza che, nell'anello a 6 GeV, ha una potenza di 1.120 kW, contro i circa 40 kW di ADONE.

Si è fatta l'ipotesi di limitare a 720 kW la massima potenza trasferita ai due fasci, corrispondente ad una corrente di 100 mA per fascio all'energia massima; di limitare inoltre a 200 mA per fascio la massima corrente. L'andamento della luminosità e della corrente in funzione dell'energia è riportato in fig. 1, per varie ipotesi sul numero massimo di bunches per fascio (1, 3 e 10 rispettivamente), avendo assunto  $M = 0.5$  m,  $\xi_m = 0.08$ ,  $\beta_z = 0.20$  m,  $\beta_x = 1.00$  m,  $\psi$  variabile da 0 a 1.40 m (vedi eq. (4-6)). La luminosità ha un massimo di  $10^{32}$   $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  a 5 GeV, e resta maggiore od uguale a  $5 \times 10^{31}$   $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  nel range da 3 a 6 GeV (nell'ipotesi di  $h = 3$ ).

Per quanto riguarda l'accumulazione dei fasci utilizzando ADONE come booster si può ottenere un tempo totale di accumulazione dell'ordine di un'ora o inferiore (vedi par. 5).

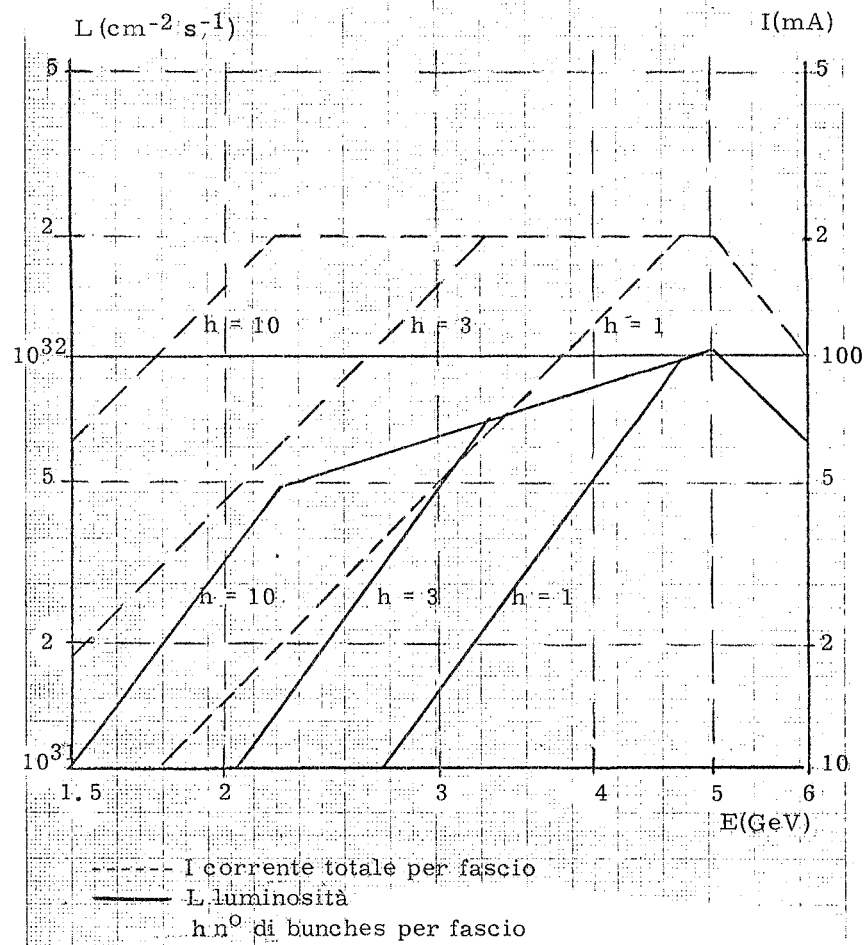


FIG. 1

BIBLIOGRAFIA -

- (1) - J.F. Augustin, Report ACO RT 35-69 (1969).
- (2) - F. Amman, Longitudinal instability due to beam-beam interaction in electron storage rings, Frascati Report LNF-71/82 (1971).
- (3) - Ya. S. Derbenyev, A.N. Skrinsky, Effetti di fase della interazione di bunches collidenti in anelli di accumulazione a strong focusing. Report Novosibirsk (1972); Traduz. LNF-72/6(Int.) (1972).
- (4) - E. Keil, Non linear space charge effects, CERN-ISR TH/72-7 (1972).
- (5) - Ya. S. Derbenyev, L'instabilità collettiva dei fasci collidenti compensati. Report Novosibirsk (1972); Traduz. LNF-72/8(Int.) (1972).