

Sezione di Torino

INFN/BE-74/7  
25 Luglio 1974

T. Bressani: POSSIBILITA' DI ACCELERARE IONI PESANTI CON IL SINCRICLOTRONE SC2 DEL CERN E RELATIVE PROSPETTIVE DI RICERCA. -

Relazione su invito presentata al "Convegno sulla conversione del sincrotrone di Frascati ad acceleratore di ioni - Frascati, 16-17 Maggio 1974"

POSSIBILITA' DI ACCELERARE IONI PESANTI CON IL SINCROTRONE SC2 DEL CERN E  
RELATIVE PROSPETTIVE DI RICERCA. -

T. Bressani

Istituto di Fisica Superiore dell'Università, I 10125 Torino e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
Sezione di Torino.

1. - INTRODUZIONE. -

Entro la fine del 1974 inizierà a funzionare presso i Laboratori del CERN la versione migliorata del Sincrotrone da 600 MeV (SC2). L'arresto della versione originaria (SC1), in esercizio dal 1957, ed il conseguente inizio dei lavori necessari ad eseguire le modifiche previste, sono avvenuti nel maggio 1973. Il programma di miglioramento prevede un aumento dell'intensità del fascio interno (da  $1,5 \mu A$  a  $10 \mu A$ ) ed una maggiore efficienza del sistema di estrazione del fascio. Si dovrebbe così ottenere un aumento di un fattore 20 dell'intensità del fascio estratto (da  $5 \times 10^{11}$  p.p.s. a  $10^{13}$  p.p.s.)(1).

L'aumento dell'intensità del fascio interno viene realizzato mediante un incremento del numero dei cicli di accelerazione al secondo (da 54,1 Hz a 466 Hz) ed una conseguente riduzione del tempo di accelerazione (da 8,5 ms a 1,3 ms). E' stato quindi necessario riprogettare e ricostruire il sistema di radiofrequenza ed in particolare il condensatore variabile. Il condensatore a diapason dell'SC1 verrà di conseguenza sostituito da un condensatore rotante (ROTCO). Nel ROTCO la variazione di capacità che permette di mantenere la frequenza del campo elettrico acceleratore ai D in sincronismo con la frequenza di rivoluzione orbitale dei protoni viene attuata mediante un'opportuna sagomatura delle palette del rotore e dello statore. La realizzazione del ROTCO ha richiesto un lungo lavoro di progettazione e soprattutto di esecuzione, a causa delle caratteristiche estremamente spinte. Le difficoltà di messa a punto di questa apparecchiatura hanno purtroppo ritardato notevolmente (circa due anni) l'inizio dei lavori di miglioramento.

Allo stato attuale le ricerche programmate presso l'SC2 sono una logica continuazione di quelle eseguite negli anni passati con l'SC1. Si prevede quindi l'utilizzazione dei fasci di mesoni  $\pi$  e  $\mu$  ottenuti dalla targhetta interna o da quella esterna sul fascio estratto per esperimenti di fisica del nucleo e di particelle elementari con tecniche di contatori. L'attualità e lo interesse di questo tipo di misure sono documentati dal fatto che sono recentemente entrate in funzione tre "meson factories" (LAMPF, SIN e TRIUMF) cioè macchine espressamente costruite per eseguire esperimenti di fisica ad energie intermedie. Il fascio estratto di protoni dello SC2 verrà usato estensivamente per il funzionamento dell'attrezzatura ISOLDE 2, di cui si parlerà in seguito.

Molto recentemente è stata pure presa in considerazione la possibilità di accelerare ioni pesanti con l'SC2, tenendo conto del crescente interesse suscitato dalla problematica della fisica con ioni pesanti ad energie intermedie ( $\sim 100$  MeV/nucleone).

2. - POSSIBILITA' DI ACCELERARE IONI PESANTI CON L'SC2. -

Si possono essenzialmente scegliere due alternative per accelerare ioni pesanti con un

sincrociclotrone:

- a) iniezione esterna del fascio di ioni, già accelerato ad energie di almeno 1 MeV/nucleone mediante un'altra macchina (Van de Graaf, Linac, Ciclotrone). Il sincrociclotrone è quindi usato come secondo stadio di accelerazione;
- b) iniezione interna, per cui si ha un solo stadio di accelerazione.

L'alternativa a) sarebbe senz'altro preferibile perchè permetterebbe di ottenere intensità maggiori, ma comporterebbe una modifica globale di tutta la macchina (magnete, D, canale d'estrazione, radiofrequenza). Bisognerebbe in pratica costruire un nuovo acceleratore. Tenuto conto di quanto detto nell'introduzione, e cioè che l'SC2 per protoni non è ancora entrato in funzione, l'alternativa a) non è stata presa in considerazione.

L'alternativa b) permette invece di lasciare inalterata buona parte dei componenti dell'SC2 (magnete, D e canale d'estrazione), modificando in maniera non sostanziale il sistema di radiofrequenza. Si dovrebbe evidentemente cambiare la sorgente di ioni. L'SC2 sarebbe così sempre in grado di accelerare protoni e potrebbero quindi coesistere presso la stessa macchina esperimenti sia con fasci di mesoni  $\pi$  e  $\mu$  sia con fasci di ioni.

Nell'ambito dell'alternativa b) sono stati calcolati<sup>(2)</sup> i valori delle energie cinetiche ottenibili per diversi tipi di ioni. Essi sono riportati nella Tabella I, unitamente ai valori

TABELLA I - Valori della radiofrequenza all'inizio ed alla fine di un ciclo di accelerazione, dell'energia cinetica, dell'energia cinetica per nucleone e dell'intensità del fascio per diversi tipi di ioni accelerabili con l'SC2.

Tipo di ione	Frequenza all'inizio del ciclo R=0 (MHz)	Frequenza alla fine del ciclo R=2,25 m (MHz)	Energia cinetica (MeV)	Energia cinetica per nucl. $\epsilon$ (MeV/A)	Intensità (p. p. s.)
${}^1_1\text{H}^+$	30,6	16,6	600	600	$10^{13}$
${}^2_1\text{H}^+$	15	11,5	363	181,5	$10^{13}$
${}^3_2\text{He}^{2+}$	20,1	13,9	914	305,4	$> 10^{12}$
${}^4_2\text{He}^{2+}$	15,1	11,6	729	183,7	$> 10^{12}$
${}^6_3\text{Li}^{2+}$	10,1	8,5	512	85,4	$> 10^{10}$
${}^{12}_6\text{C}^{4+}$	10,1	8,5	1022	85,8	$> 10^{10}$
${}^{14}_7\text{N}^{5+}$	10,8	8,5	1277	97,9	$> 10^{10}$
${}^{16}_8\text{O}^{6+}$	11,3	9,4	1706	107,5	$> 10^{10}$
${}^{20}_{10}\text{Ne}^{6+}$	9,1	7,8	1391	70,1	$> 10^{10}$

della radiofrequenza all'inizio del ciclo di accelerazione (ioni al centro del magnete) ed alla fine del ciclo stesso (ioni in un'orbita di raggio  $R=2,25$  m, corrispondente al canale di estrazione). I valori delle intensità per  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^3_2\text{He}$  e  ${}^4_2\text{He}$  sono stati valutati dallo scrivente in base alle caratteristiche della macchina e delle sorgenti di ioni. E' evidente che per accelerare ioni pesanti con l'SC2, è necessario diminuire tanto il valore assoluto della radiofrequenza quanto il rapporto  $f_{\max}(R=0)/f_{\min}(R=2,25\text{ m})$  rispetto ai valori relativi all'accelerazione di protoni.

Hohbach<sup>(3)</sup> ha proposto una semplice soluzione, limitata alla accelerazione di  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^3_2\text{He}$  e  ${}^4_2\text{He}$ . Il valore assoluto della radiofrequenza può venire diminuito mediante l'inserzione di una linea costituita da tre tubi coassiali di lunghezza opportuna fra il cono di raccordo del ROTCO ed il D. Aumentando così la lunghezza della cavità risonante (a mezza lunghezza d'onda), viene diminuita la frequenza propria di risonanza. Il rapporto  $f_{\max}/f_{\min}$  può venire diminuito mediante l'inserzione di un condensatore in parallelo al ROTCO. La variazione tra  $f_{\max}$  e  $f_{\min}$  rimane peraltro fissata dalla sagomatura delle palette del ROTCO, calcolata per l'accelerazione dei protoni e non certo per l'accelerazione di altri tipi di ioni. E' peraltro possibile trovare un programma di accelerazione valido anche per altre particelle sfruttando la modulazione in ampiezza dell'oscillatore che eccita il D, prevista già nel progetto originario dell'SC2. In conclusione, non sembra che vi siano grosse difficoltà di principio per accelerare ioni con  $Z \leq 2$ .

L'accelerazione di ioni di carica maggiore è resa più difficile dal fatto che, con l'aumento di  $Z$ , diventano sempre più marcate le perdite di fascio dovute a reazioni di scambio di carica con gli atomi del gas residuo. Tali perdite si verificano soprattutto nella prima parte del ciclo di accelerazione, quando la velocità degli ioni è piccola. Nell'SC2 tale circostanza è peggiorata dal fatto che all'inizio del ciclo il guadagno di energia sincrona per giro è notevolmente minore del guadagno massimo possibile, e questo onde permettere ad un maggior numero di particelle emesse dalla sorgente di essere catturate in orbite stabili. Si potrebbe quindi pensare di modificare il programma di accelerazione per ioni pesanti e fare guadagnare ad essi la massima energia possibile per giro già all'inizio del ciclo. Diminuirebbero così le perdite di fascio dovute a collisioni con il gas residuo, ma sarebbe pure ridotta l'intensità del fascio catturato in orbite stabili alla sorgente. Giannini e Mandrillon<sup>(4)</sup> hanno iniziato molto recentemente uno studio dettagliato del problema. L'effetto della pressione del gas residuo e del diverso programma di accelerazione sul coefficiente di trasmissione del fascio è chiaramente dimostrato dalla Tabella II. Si otterrebbe un grande aumento del fascio accelerato diminuendo la pressione da  $3 \times 10^{-6}$  Torr (valore attuale dell'SC2) a  $1 \times 10^{-6}$  Torr. Gli autori stanno cercando di trovare il compromesso migliore, avendo come obiettivo minimo la accelerazione di un fascio di intensità superiore a  $10^{10}$  p.p.s. La soluzione che prevede il cambiamento del programma di radiofrequenza con conseguente riduzione del tempo di accelerazione potrebbe peraltro comportare la necessità di modificare il sistema di estrazione del fascio. Per quanto riguarda infine la risoluzione energetica dei fasci di ioni pesanti, si può ritenere che essa sia dell'ordine di grandezza di quella per protoni, e cioè  $\sim 0,1\%$ .

TABELLA II - Valori del coefficiente di trasmissione per ioni  ${}^{12}_6\text{C}^{4+}$  e  ${}^{14}_7\text{N}^{5+}$  in funzione della pressione del gas residuo e per due diversi programmi di accelerazione (programma 1 - accelerazione normale; programma 2 - accelerazione rapida).

Pressione (Torr)	Coefficiente di trasmissione			
	Programma di frequenza 1		Programma di frequenza 2	
	${}^{12}_6\text{C}^{4+}$	${}^{14}_7\text{N}^{5+}$	${}^{12}_6\text{C}^{4+}$	${}^{14}_7\text{N}^{5+}$
$3 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-4}$
$2 \times 10^{-6}$	$6,1 \times 10^{-4}$	$8,2 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$3,5 \times 10^{-3}$
$1 \times 10^{-6}$	$2,4 \times 10^{-2}$	$9,1 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$5,9 \times 10^{-2}$

Da quanto esposto risulta evidente che i fasci di ioni ottenibili con l'SC2 non potranno mai competere con quelli previsti per le macchine del progetto GANIL o N.H.L. (Oak Ridge). Queste sono state espressamente progettate per l'accelerazione di ioni pesanti, e forniranno fasci la cui intensità sarà di due o tre ordini di grandezza superiore. Esse entreranno, peraltro in funzione dopo il 1980 e gli esperimenti di prima generazione potrebbero quindi essere eseguiti con la macchina del CERN.

### 3. - PROSPETTIVE DI RICERCA CON I FASCI DI IONI PESANTI DELL'SC2. -

Nella Fig. 1 sono riportati in funzione del numero atomico Z dello ione accelerato, i

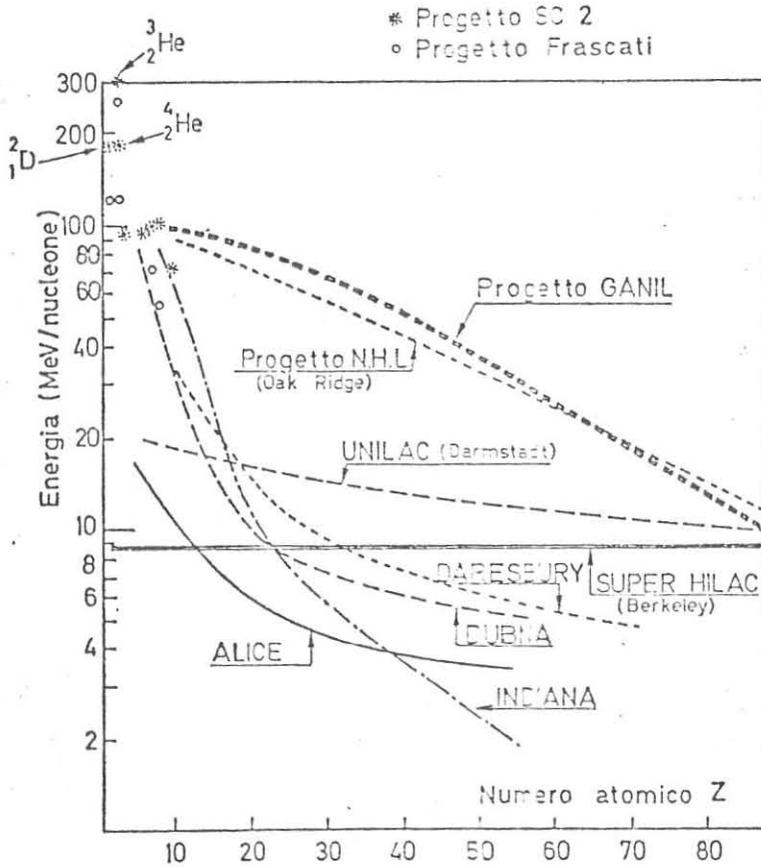


FIG. 1 - Energia per nucleone in funzione del numero atomico Z, e per gli stati di carica indicati nella Tabella I, ottenibile con i progetti SC2 e Frascati. A titolo di paragone sono riportati i valori relativi ad altre macchine in esercizio od in progetto, tratti dal rapporto GANIL.

valori dell'energia cinetica per nucleone (MeV/A), tratti dalla Tabella I. Sono pure riportati i valori massimi previsti dal progetto di Bratti et al.<sup>(5)</sup> relativo alla conversione dell'Elettrosincrotrone di Frascati ad acceleratore di ioni pesanti. A scopo di paragone sono state pure riportate le curve relative ad altre macchine in esercizio o in progetto, tratte dal rapporto GANIL. Mancano i valori del Bevalac molto superiori a quelli tipici dell'SC2. Dal grafico risulta evidente la regione in cui l'SC2 è una macchina competitiva: ioni a basso numero atomico accelerati ad energie per cui  $\epsilon \sim 100$  MeV/A. Per  $Z \leq 2$  nessuna delle macchine progettate può fornire fasci con  $\epsilon$  paragonabile; per  $Z > 2$  le macchine dei progetti GANIL ed N.H.L. forniscono fasci ad simile ma intensità molto maggiore (dopo il 1980 però). Esaminiamo ora alcune delle linee di ricerca che si possono individuare in questa particolare regione e possono quindi essere mandate avanti all'SC2.

#### I. Cattura radiativa di ioni leggeri da nuclei leggeri. -

Fabrizi et al.<sup>(6)</sup> hanno proposto di studiare la reazione:



indotta da deutoni di 360 MeV. Il paragone delle sezioni d'urto differenziali per la reazione (1) con quelle relative alla reazione inversa:



indotta da fotoni di energia corrispondente alla stessa energia nel sistema del centro di massa della (1), può evidenziare eventuali violazioni dell'invarianza per inversione temporale. E' necessario eseguire in parallelo una misura della reazione (2) presso un acceleratore di elettroni, con la stessa precisione. Misure relative alle reazioni (1) e (2) furono già eseguite parecchi anni fa<sup>(7,8,9)</sup> rivelando una sola particella,  ${}^4_2\text{He}$ , nello stato finale. Tali esperimenti sono a bassa statistica ed in contrasto reciproco; risulta quindi evidente l'importanza di eseguire un esperimento di buona qualità rivelando in coincidenza ambedue le particelle emesse. Bisogna ricordare che la reazione (1) è dominata da transizioni di quadrupolo elettrico o multipolarità di ordine superiore, mentre altre reazioni esaminate allo scopo di evidenziare eventuali violazioni di T erano dominate da transizioni di dipolo elettrico o magnetico<sup>(10)</sup>. Come sottoprodotto è pure possibile ottenere un limite superiore per la sezione d'urto della reazione:



proibita per conservazione dell'isospin, e quindi un limite superiore per un'eventuale violazione di questa regola di selezione.

E' evidente che le tecniche ed apparecchiature sperimentali messe a punto ed utilizzate per lo studio della (1) possono essere usate per lo studio generalizzato delle reazioni a due corpi:



con a e b nuclei leggeri, alle energie tipiche dell'SC2. Dalla analisi della distribuzione angolare dei fotoni emessi nella (4) è possibile ottenere informazioni dettagliate sulla struttura delle funzioni d'onda del nucleo prodotto c, soprattutto ad alti momenti trasferiti<sup>(11)</sup>. Una limitazione all'uso della tecnica della coincidenza per lo studio della (4) deriva dalle difficoltà di poter rivelare il nucleo prodotto c all'aumentare del suo numero di massa (targhette molto sottili). Una maniera per ovviare a tali difficoltà sarebbe quella di misurare energia e direzione del fotone emesso, determinando quindi in maniera univoca l'energia totale dell'altro prodotto della reazione. Potrebbero così essere studiati anche stati eccitati di c, mentre le misure in coincidenza possono dare informazioni solo relativamente allo stato fondamentale. Con le tecniche attuali è possibile costruire uno spettrometro a coppie del tipo Berkeley<sup>(12)</sup> in grado di misurare l'energia di fotoni da varie centinaia di MeV con una risoluzione dell'1% ed una efficienza di  $\sim 10^{-3}$ .

## II. Compressibilità della materia nucleare e relative onde d'urto. -

L'importanza di questi fenomeni è stata recentemente puntualizzata da Bondorf<sup>(13)</sup>. Quando si esaminano reazioni indotte da ioni ad  $\epsilon$  maggiore di 50 MeV/A, devono essere tenute ben presenti queste due proprietà:

- la velocità del moto relativo dei due nuclei nello stato iniziale è maggiore od uguale alla velocità dei nucleoni all'interno dei nuclei.
- la barriera Coulombiana è trascurabile.

Come conseguenza del primo punto si possono verificare effetti che aprono un nuovo campo di speculazione per la fisica del nucleo. La compressibilità della materia nucleare diviene un parametro importante nella descrizione di tali reazioni, e si possono verificare fenomeni di onde d'urto di compressione. Si possono distinguere due classi di onde elastiche nei nuclei, le onde superficiali e le onde di compressione. La velocità di propagazione delle prime è dell'ordine di 0,1 c, che corrisponde alla velocità di un nucleone di  $\sim 5$  MeV. La velocità di propagazione delle onde di compressione è dell'ordine di 0,3 c, e ciò equivale alla velocità di

un nucleone di  $\sim 50$  MeV. Se i proiettili che inducono le reazioni hanno velocità superiori ai valori citati, si può verificare il fenomeno delle onde d'urto. Da tale punto di vista si possono quindi dividere le reazioni indotte da ioni pesanti in tre categorie, come schematizzato in Fig. 2.

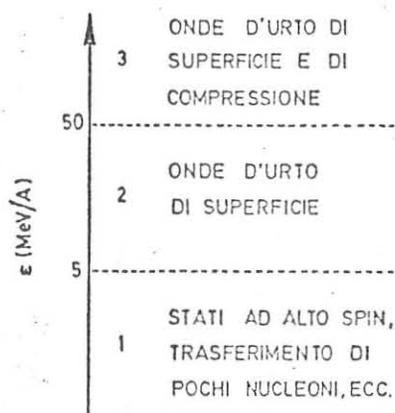


FIG. 2 - Classificazione delle reazioni indotte da ioni pesanti dal punto di vista delle onde di urto nella materia nucleare.

Nella regione 1 la velocità del proiettile non può produrre onde d'urto. Questa regione è stata studiata abbastanza in dettaglio con le macchine esistenti. E' possibile eseguire misure spettroscopiche, e si sono ricavate quindi importanti informazioni relative agli stati a grande momento angolare ed alle reazioni con trasferimento di pochi nucleoni.

Non esistono molti esperimenti nella regione 2, dove possono verificarsi onde d'urto di superficie. Non è stato possibile eseguire studi spettroscopici a causa della limitata risoluzione energetica dei fasci esistenti e sono state quindi misurate distribuzioni spettrali continue. Si possono individuare due tipi di reazioni predominanti: di fusione e di frizione che possono essere distinte dall'analisi delle distribuzioni angolari e di massa. Non è comunque stato chiarito per ora il meccanismo della reazione e non sono state eseguite misure di molteplicità delle particelle emesse.

Esistono scarsissime informazioni sperimentali per la regione 3, dove possono coesistere le onde di superficie e di compressione. Ci si può aspettare che, a causa dell'elevata energia del proiettile, predominino le reazioni a molte particelle. La distribuzione angolare dei prodotti della reazione potrebbe fornire informazioni relative alla materia nucleare fortemente compressa durante l'onda d'urto. In analogia a quanto avviene in altre situazioni fisiche di onde d'urto, i prodotti della reazione potrebbero essere emessi entro un cono la cui apertura sarebbe legata al rapporto tra la velocità delle onde superficiali o di compressione nel nucleo e la velocità del proiettile.

### III. Produzione collettiva di mesoni. -

Esaminiamo ad esempio la reazione



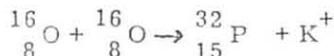
indotta da deutoni di 360 MeV. Essa è cinematicamente permessa, ma la descrizione del meccanismo di produzione dei mesoni  $\pi$  non può essere quella abituale, basata su collisioni singole nucleone - nucleone. Nel caso illustrato i nucleoni del deutone incidente hanno un'energia di 180 MeV, inferiore alla soglia di produzione di  $\pi$  da reazioni nucleone - nucleone. Ambedue i nucleoni incidenti contribuiscono quindi alla produzione di  $\pi$ . Analoghe considerazioni si possono fare per proiettili più pesanti, come ad esempio:



indotte da ioni di  ${}^{16}_8\text{O}$  da  $\sim 1700$  MeV ( $\sim 107$  MeV/A).

Per tali energie incidenti diventa pure possibile la produzione di mesoni K:

(7)



In pratica è estremamente improbabile che avvengano le reazioni a due corpi del tipo (5), (6) e (7), perchè il momento trasferito al nucleo (o ipernucleo) prodotto è molto elevato. La situazione è illustrata dalla Fig. 3 dove sono riportate, a titolo di esempio, le cinematiche per la reazione (5), che è un caso relativamente favorevole, e per la reazione (7), che è invece un caso molto sfavorevole. E' logico quindi aspettarsi reazioni a più corpi nello stato finale. Il problema di questa produzione "collettiva" di mesoni da parte del nucleo incidente è quindi molto in interessante. Si è preferita la dizione "collettiva" a "coerente" in quanto nelle reazioni citate vengono a mancare i requisiti tipici delle reazioni coerenti, e cioè  $qR \ll 1$  ed eguaglianza dei numeri di massa del nucleo bersaglio e del nucleo prodotto.

L'informazione sperimentale relativa alle reazioni suddette è quanto mai carente. Esistono alcune misure relative alla produzione di  $\pi^0$  da parte di  ${}^3_2\text{He}$  di 200 MeV su nuclei di  ${}^{12}\text{C}$  e  ${}^{208}\text{Pb}$  eseguite presso il Ciclotrone dell'Università del Maryland<sup>(14)</sup>. Non esistono, a conoscenza dello scrivente, calcoli o modelli teorici per tali reazioni. Un semplice modello statistico potrebbe forse fornire una prima indicazione dell'ordine di grandezza delle sezioni d'urto.

#### IV. Diffusione elastica e quasi-elastica di ioni da nuclei. -

La misura di fisica nucleare più semplice, in linea di principio, che si possa pensare di eseguire con i fasci di ioni dell'SC2 è quella relativa alla diffusione elastica ed anelastica. Esistono moltissimi esperimenti eseguiti con fasci di bassa energia, e sono ben noti i risultati e le relative informazioni concernenti il modello ottico del nucleo e le proprietà degli stati eccitati nucleari. Sarebbe quindi di notevole interesse avere a disposizione un insieme di dati ad energie maggiori di circa un ordine di grandezza. Più importanti ancora sono le misure di diffusione quasi-elastica, ad es. ( $\alpha, 2\alpha$ ), che permettono di evidenziare le sottostrutture (clusters) nucleari, e per le quali è utile disporre di proiettili d'elevata energia. In tali condizioni sono infatti meno importanti gli effetti delle interazioni nello stato finale ed è quindi possibile studiare regioni più interne del nucleo. Si potrebbero infine studiare ad energie più elevate tutte le reazioni di stripping, pick-up e trasferimento di pochi nucleoni indotte finora a fasci di ioni prodotti da Ciclotroni od acceleratori elettrostatici.

Esistono peraltro due argomenti che inducono ad una certa perplessità nei riguarda di questa linea di ricerca all'SC2. Il primo, di carattere pratico, consiste nella necessità di disporre di uno spettrometro ad altissimo potere risolutivo per poter effettuare misure significative. Il costo di tale spettrometro, in questa regione di energie, è notevolmente elevato. Il secondo argomento, di natura scientifica, è che la macchina del CERN può fornire soltanto fasci ad energia fissa e non si possono quindi ricavare per le reazioni sopra menzionate le funzioni di eccitazione, la cui conoscenza è indispensabile per la comprensione dei meccanismi di reazione.

#### V. Produzione di isotopi instabili rari. -

In concomitanza con il programma di modifiche del Sincrociclotrone è stato eseguito un notevole miglioramento del separatore isotopico in linea (ISOLDE 2). A causa dell'aumento di intensità del fascio estratto si è resa necessaria la ricostruzione delle schermature del precedente separatore (ISOLDE1), e si è approfittato di tale interruzione per eseguire sostanziali modifiche e migliorie dell'attrezzatura stessa, in particolare, mediante un complicato sistema di ottica elettronica, sarà possibile fornire contemporaneamente fasci di isotopi instabili selezionati a tre utilizzatori. Il programma sperimentale di ISOLDE2, molto vasto ed articolato, è concentrato sullo studio dei nuclei molto lontani dalla curva di stabilità. Verranno soprattutto esaminati nucleidi con difetto di neutroni; per essi si effettueranno:

- a) misure di spin e momenti magnetici nucleari con il metodo del pompaggio ottico,
- b) determinazioni precise di massa mediante un secondo spettrografo di elevatissimo potere risolutivo,
- c) misure di vita media per decadimento  $\alpha$  ed emissione di protoni,
- d) misure relative al decadimento radioattivo ritardato (cioè susseguente ad un decadimento  $\beta$ ),

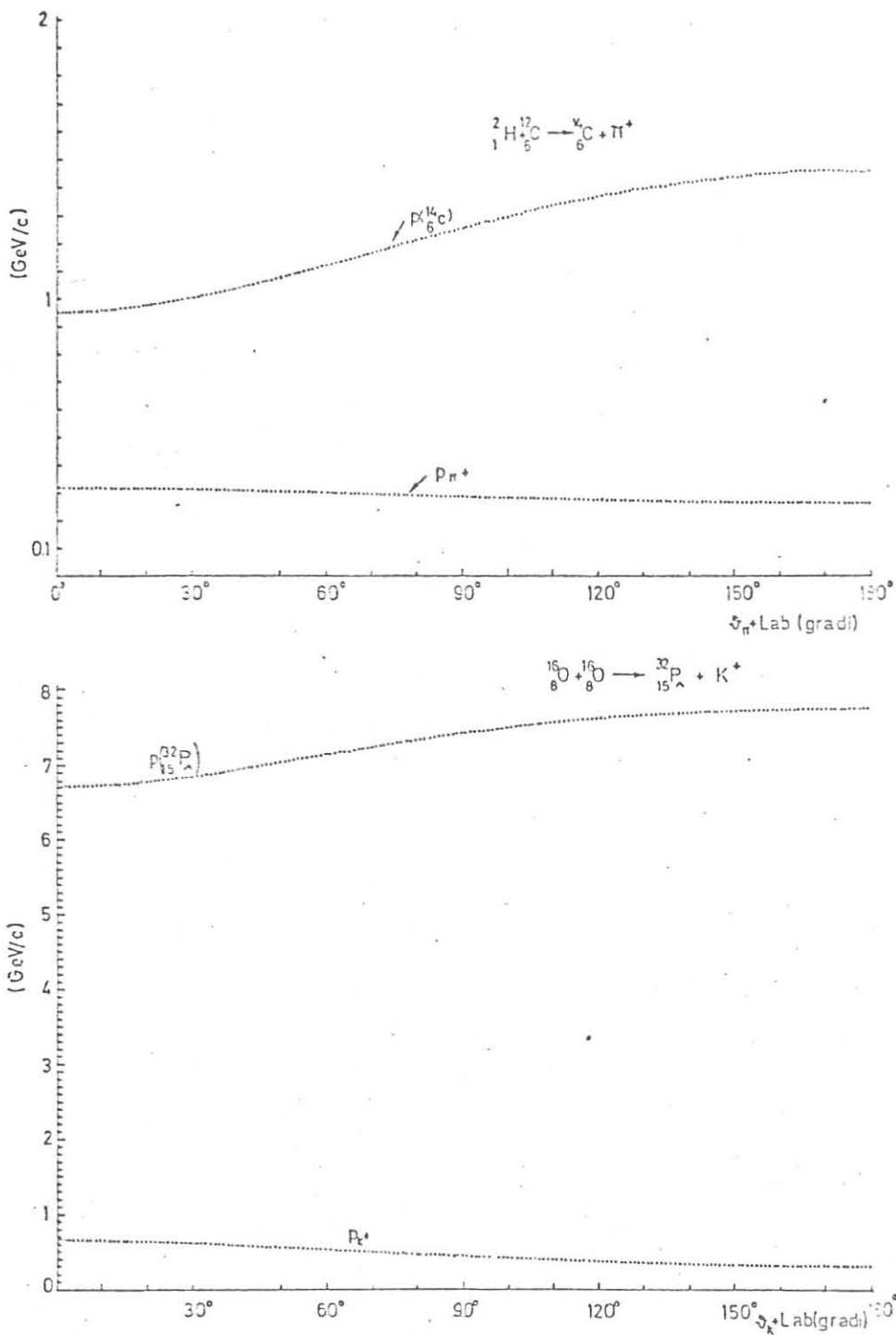


FIG. 3- Cinematica delle reazioni  ${}^2_1\text{H} + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + \pi^+$  indotta da  ${}^2_1\text{H}$  di 360 MeV e  ${}^{16}_8\text{O} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^{32}_{15}\text{P} + \text{K}^+$  indotta da ioni  ${}^{16}_8\text{O}$  di 1700 MeV. Le quantità di moto e gli angoli si riferiscono al sistema del laboratorio.

e) studi spettroscopici di stati eccitati.

E' infine prevista la separazione quantitativa ( $\sim 0,1 \mu\text{g/giorno}$ ) di nuclidi con vita media relativamente lunga ( $\sim 1$  giorno) ed il loro successivo utilizzo come targhette per particelle in reazioni nucleari.

I nuclidi instabili separati ed analizzati mediante ISOLDE 2 verranno prodotti da reazioni di frammentazione dei nuclei della targhetta del separatore isotopico indotte dai protoni di 600 MeV. L'utilizzazione di fasci di ioni pesanti potrebbe ampliare enormemente lo spettro di massa dei nuclidi prodotti e quindi la potenzialità di ISOLDE 2. Supponendo, ad esempio, di usare un fascio di  ${}^3_2\text{He}$  di 914 MeV<sup>(15)</sup>, ci si può aspettare che la maggiore energia cinetica fornita al bersaglio da proiettili di velocità minore dei protoni di 600 MeV sposti l'intero spettro di massa dei prodotti della reazione ancora più lontano dalla linea di stabilità. L'uso di  ${}^3_2\text{He}$  sembra il più promettente perchè questo è lo ione per cui il rapporto  $Z/A$  è massimo, ma non è escluso che altri tipi di ioni d'energia cinetica maggiore ( ${}^{16}_8\text{O}$  di 1706 MeV) possano rivelarsi utili a produrre isotopi instabili rari.

#### 4. - CONSIDERAZIONI FINALI E PARAGONE CON LE PROSPETTIVE OFFERTE DALLA MACCHINA DI FRASCATI. -

Da quanto esposto nel precedente paragrafo appare chiaro che un programma di ricerche con ioni pesanti all'ISOLDE 2 sarebbe di notevole interesse e del tutto competitivo, almeno fino al 1980. Dopo tale data le macchine dei progetti GANIL e N.H.L. sarebbero in grado di fornire fasci di energia equivalente, ma con intensità molto maggiori. La limitazione maggiore del progetto SC 2 è peraltro costituita dal fatto che questa macchina può accelerare soltanto fasci ad energia fissa. Questa circostanza è inessenziale per la linea di ricerca V (produzione di isotopi), non molto grave per le esperienze di prima generazione della linea II (compressibilità nucleare) e III (produzione collettiva di mesoni), abbastanza pesante per la linea I (cattura radiativa di ioni leggeri da nuclei leggeri) e proibitiva per la linea IV (reazioni nucleari).

Il progetto di conversione dell'Elettrosincrotrone di Frascati prevede di ottenere fasci di ioni con  $\epsilon(\text{MeV}/A)$  leggermente inferiore a quelli dell'ISOLDE 2, come visibile in Fig. 1. Tenuto conto che le esperienze di prima (e forse seconda) generazione non necessitano di intensità di fascio molto elevate, tutte le linee di ricerca I-IV potrebbero venire sviluppate presso la macchina di Frascati e fornire risultati di qualità molto superiore a quelli ottenibili con il Sincrociclotrone del CERN proprio in virtù dell'energia variabile. Mediante esperimenti della linea I sarebbe così possibile osservare gli effetti legati alla produzione della risonanza  $\Delta(1236)$  nei nuclei, in quelli delle linee II e III si potrebbero isolare ed individuare meglio i diversi meccanismi di reazione e per gli esperimenti della linea IV cadrebbe la pregiudiziale di merito scientifico esposta in precedenza.

Anche per la macchina di Frascati vale il discorso fatto per l'ISOLDE 2 a proposito della concorrenza da altri acceleratori, da aspettarsi dopo il 1980. Prima di tale data l'acceleratore di Frascati potrebbe essere il più versatile, e forse l'unico al mondo (date le incertezze relative al progetto SC 2) nel dominio di energia considerato.

#### BIBLIOGRAFIA. -

- (1) - Synchro-cyclotron of 600 MeV - Documento CERN/P10 74-1 (1974).
- (2) - R. Giannini e P. Mandrillon, Rapporto non pubblicato.
- (3) - R. Hohbach, rapporto CERN MSC-73-2 (1973).
- (4) - R. Giannini e P. Mandrillon, Rapporto CERN PH III - 74/25 (1974).
- (5) - G. Brautti, Rapporto interno dell'Università di Bari (1972); e questi Rendiconti.
- (6) - F.L. Fabbri, P. Picozza, C. Schaerf, F. Calligaris e C. Cernigoi, Rapporto CERN PH III - 71/8 (1971).
- (7) - Y.K. Akimov, O.V. Savchenko e L.M. Soroko, Sov. JETP 14, 512 (1962).
- (8) - J.A. Poirier e M. Pripstein, Phys. Rev. 130, 1171 (1963).
- (9) - J.G. Asbury e F.J. Loeffler, Phys. Rev. B137, 1214 (1965).
- (10) - B.L. Schrock, J.K. Detoef, R.P. Haddeo, J.A. Helland, M.J. Longo, K.K. Young, S.S.