

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Triennale
in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Triennale

Gravità Artificiale realizzata tramite macchine centrifughe Possibili applicazioni e futuri sviluppi



Relatrice:

Prof.ssa Stefania Scarsoglio

Candidato:

Davide Marampon

Anno Accademico 2018/2019

Ottobre 2019

INDICE

<i>INTRODUZIONE</i>	<i>p. 2</i>
<i>EFFETTI DELLA MICROGRAVITA'</i>	<i>p.4</i>
<i>GRAVITA' ARTIFICIALE COME POSSIBILE CONTROMISURA</i>	<i>p.14</i>
<i>PECULIARITA' DELL'USO DELLA CENTRIFUGA</i>	<i>p.34</i>
<i>CONCLUSIONI</i>	<i>p.49</i>
<i>BIBLIOGRAFIA</i>	<i>p.54</i>

INTRODUZIONE

Questa ricerca si pone lo scopo di evidenziare i numerosi e, spesso poco conosciuti, effetti collaterali di una prolungata permanenza in un ambiente privo di gravità o, comunque, in condizioni di gravità ridotta rispetto a livelli terrestri.

Sono tutte problematiche che la comunità scientifica e coloro che investono con sempre maggiori fondi nella ricerca spaziale si stanno ponendo. Sia a livello privato, per la possibilità di un futuro “Turismo Spaziale”, paventato da aziende come “SpaceX” e “Blue Origin”, sia a livello di ricerca accademica e scientifica.

Con la futura dismissione della I.S.S.¹, i prossimi ed avveniristici obiettivi che l’esplorazione spaziale si pone sono una possibile base in orbita intorno alla Luna o addirittura sulla superficie del nostro satellite. Senza contare la mai completamente abbandonata idea dello sbarco umano su Marte, che sembra sempre più dietro l’angolo visto il riaccendersi dell’interesse per l’esplorazione spaziale, che trascina con sé anche nuovi attori tra i paesi emergenti, come Cina ed India.

Tutte le missioni sopracitate, per la loro complessità e lunghezza dell’ordine di grandezza di anni, implicano necessariamente un’altissima conoscenza dell’ambiente in cui ci andremo, molto probabilmente, a muovere e dei non trascurabili effetti che esso eserciterà sul corpo umano. Queste ricerche riguardano solo gli astronauti per ora, ma se questo “turismo” o, meglio ancora, esplorazione spaziale decollerà, riguarderà anche individui “comuni”, ossia coloro che non si sono sottoposti ad un addestramento specifico per essere astronauti. Ed è vitale sapere, almeno in prima approssimazione, come il loro fisico, per esempio, risponderà alla gravità lunare ($1/6 * g$, con $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ accelerazione di gravità sulla Terra) o, ancora peggio, alla quasi totale assenza di gravità che si troverebbero ad affrontare nel viaggio verso Marte.

Coloro che si sono concentrati su questo argomento hanno evidenziato che la principale contromisura per gli effetti negativi del volo spaziale di media-lunga durata è costituita in gran parte dall’uso di una macchina centrifuga. Questa ricerca cercherà di spiegare le basi del funzionamento di tali dispositivi e come essi possano costituire un beneficio per gli astronauti che ne usufruiranno. Nel primo capitolo si evidenzieranno in generale la maggior parte dei sintomi che si sono raccolti sugli astronauti tramite i dati empirici delle molte esplorazioni spaziali finora effettuate. La ricerca in tale

¹ I.S.S.: International Space Station, nata dalla collaborazione tra le agenzie spaziali di U.S.A., Russia, Giappone, Canada ed Europa

sensò è stata possibile solo in tempi relativamente recenti ed ha avuto notevoli sviluppi in un numero ridotto di anni grazie alla collaborazione di molti paesi di Asia, America ed Europa che con la fine della Guerra Fredda hanno iniziato a condividere i loro progetti e tecnologie. L'I.S.S. costituisce l'esempio piú lampante di questa collaborazione. Essa è il principale luogo di ricerca riguardo questi argomenti dato che essa possiede la caratteristica unica di essere sia luogo di esperimento sia soggetto stesso della ricerca. Così come i suoi occupanti sono al tempo stesso ricercatori e cavie.

Nel secondo capitolo si passerà a spiegare come la centrifuga possa essere usata per combattere tali effetti negativi. Seguirà una descrizione delle ricerche finora effettuate sugli umani, esse cercano di capire principalmente di capire se e come sia possibile sfruttare queste macchine per combattere il decondizionamento e il deallenamento del corpo umano indotto dalla microgravità.

Il terzo capitolo analizzerà gli aspetti piú ingegneristici e progettuali di tali tecnologie, concentrandosi sulla loro possibile implementazione. Verrà, inoltre, fornita una panoramica sui parametri di progetto e sui modelli matematici che possono essere usati in sede sperimentale e di avamprogetto per cominciare ad elaborare teorie riguardo contesti per cui una ricerca empirica diretta risulterebbe troppo onerosa.

EFFETTI DELLA MICROGRAVITA'

Il nostro corpo si è evoluto in un ambiente di gravità che genera un'accelerazione pressoché costante in modulo su di esso. Le nostre ossa e i muscoli responsabili del movimento si sono evoluti e specializzati nel corso dei millenni a queste condizioni. Se esse dovessero improvvisamente mancare, il nostro sistema nervoso simpatico darebbe il comando necessario per avviare la secrezione del gene autofago che andrà a sopprimere quei muscoli o quelle ossa che risultano inutili al funzionamento normale del corpo, riducendoli in volume e massa.

La microgravità è definita come un campo di forza centripeta agente in un ambiente dove, nonostante possa sembrare che ci sia una totale assenza di peso, sono comunque presenti minime variazioni di questo valore dovute al fatto che in tale sistema di riferimento non si verifica mai la totale e completa assenza di forze. Queste oscillazioni hanno come effetto delle variazioni nel peso del soggetto.

Un esempio di questa condizione si può sperimentare sulla Stazione Spaziale Internazionale

La vita e le attività di ricerca sulla I.S.S. sono svolte in ambiente di microgravità, ma contrariamente a quanto avverrebbe per una missione nello spazio profondo l'assenza di gravità all'interno della Stazione è dovuta solamente al fatto che essa abbia un decadimento orbitale di 2'000 m al mese.

Essa orbita ad una velocità tale intorno alla Terra che gli astronauti vedono sorgere il Sole 15 volte circa per ogni giorno terrestre, viceversa se essa avesse un moto uguale a quello terrestre e si mantenesse su un'orbita fissa con un'altezza media dalla superficie, $h_m = 400$ km, il personale di bordo sarebbe ancora in grado di percepire un'accelerazione di gravità pari ad:

$$a(h=h_m) = G \cdot M_{TERRA} / (R_{TERRA} + h_m)^2 \approx 8,6884 \text{ m/s}^2 \approx 0,89 \cdot g$$

dove:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$$

costante universale di gravità

$$M_{TERRA} = 5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

massa della Terra

$$R_{TERRA} = 6'371 \cdot 10^3 \text{ m}$$

raggio medio della Terra

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

accelerazione media di gravità sulla superficie Terra

Gli effetti indotti dalla microgravità che finora sono conosciuti, per quanto riguarda l'apparato cardiovascolare e locomotore, includono, ma non si limitano a:

- Perdita di massa ossea e muscolare
- Riduzione di dimensioni del cuore con conseguente crollo della pressione venosa e arteriosa (che si può riassumere come “decondizionamento cardiovascolare”). Si registra inoltre un aumento dell'output di sangue dal cuore che porta ad una vasodilatazione nelle zone periferiche del corpo.
- Crolla la produzione di plasma.
- Nei primi giorni di permanenza nello spazio gli astronauti presentano un anomalo gonfiore e rossore facciale. Esso è dovuto al fatto che, in presenza di gravità significativamente più bassa di quella terrestre, il sangue abbia una maggiore concentrazione di sangue in corrispondenza della testa e del collo
- Problemi di equilibrio (gli otoliti² sono sensibili all'accelerazione lineare e danno al cervello informazioni sullo spazio verticale e sull'equilibrio)
- Problemi di coordinazione occhio-testa con conseguenti difficoltà di postura e di orientamento
- Intolleranza ortostatica (ossia l'incapacità di mantenere un flusso di sangue al cervello quando si è in posizione verticale)
- Modificazioni nel microbioma dell'intestino (basso rischio)

² **OTOLITE:** concrezione gelatinosa composta da ossalato di calcio contenuta nell'orecchio interno

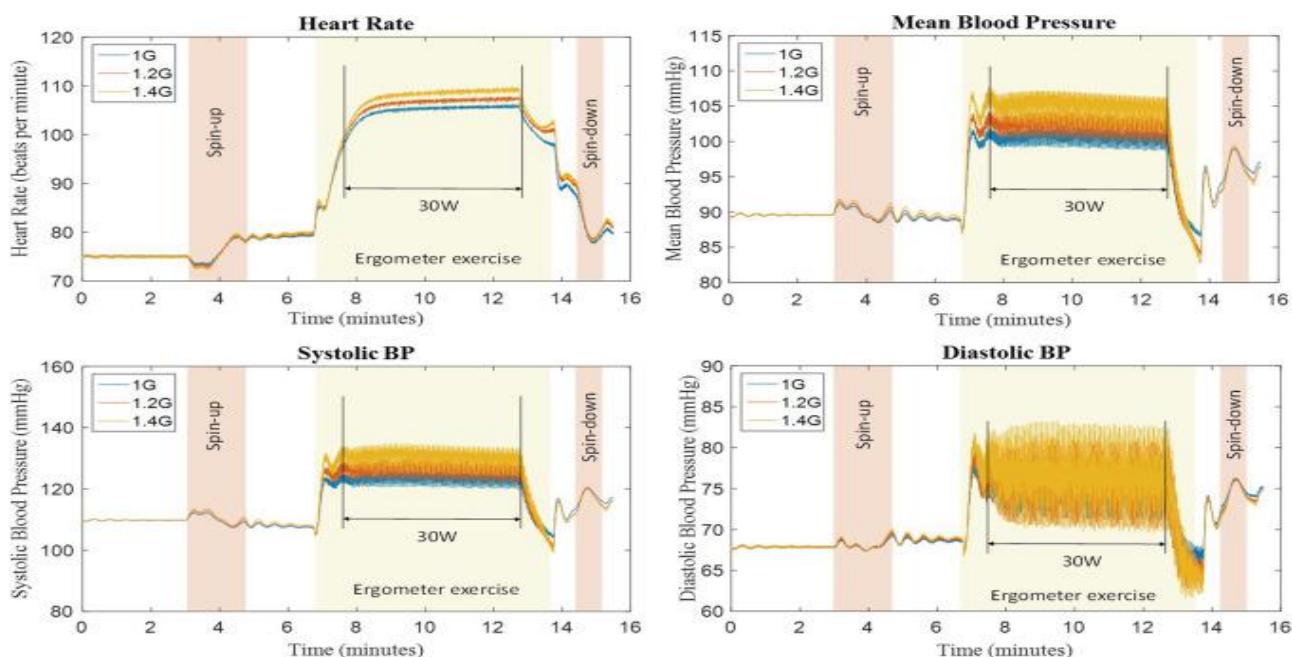


Fig. 1: Andamento in funzione del tempo del battito cardiaco, pressione media del sangue, pressione sistolica e diastolica. Le variabili cardiovascolari qui riportate vengono mostrate nel loro andamento quando le cavie sono state sottoposte ad un esercizio fisico di 15,5 min in ambiente di gravità artificiale. Ci sono tre livelli di intensità: 1g (linea blu), 1,2g (linea rossa), 1,4g (linea gialla). Questi sono misurati rispetto ai piedi del soggetto mentre la testa è assunta in corrispondenza del centro di rotazione.

Immagine tratta da [8].

I difetti sopra citati sono solo una minima parte, riguardante principalmente problemi di decondizionamento nei vari fluidi corporei, con particolare attenzione all'apparato cardio-circolatorio [1]. In molti casi le conseguenze reali di una prolungata permanenza nello spazio devono essere ancora studiate nei loro molteplici aspetti, così come nelle loro possibili contromisure.

Questi ambiti saranno i principali interessati di questa ricerca, ma è doveroso riportare comunque altre problematiche che, pur esulando dallo scopo di questo lavoro, insorgono negli astronauti in seguito alle loro missioni:

- Problemi causati dalla microgravità del volo spaziale sul cervello (danneggiamento della pressione intracranica, problemi neuro-vestibolari³ e alterazioni nelle funzioni della corteccia cerebrale) [2]
- Problemi alla produzione di collagene, inspessimento di carotide e retina

³ Aumento di pressione dei fluidi contenuti nel labirinto auricolare interno

- 6 ore nello spazio causano un invecchiamento cellulare pari a quello che sulla Terra si ha in 10 anni.

Anche per quanto riguarda il corpo nel suo complesso, si sono viste delle similitudini tra gli effetti negativi del volo spaziale e l'invecchiamento sulla Terra. Sia gli astronauti che le persone più anziane tendono ad avere perdite di massa ossea e muscolare, problemi circolatori dovute a valori di pressioni fuori norma, seri problemi di equilibrio o coordinazione.

Tutto ciò può portare, al momento in cui si è in ambiente con livelli "terrestri" di gravità, a cadute e a tutte le complicità da esse causate. Persone anziane o malati impossibilitati a muoversi, e costretti a letto per molto tempo, mostrano sintomi di decondizionamento, simili a quanto accade agli astronauti. È importante analizzare attentamente anche questi aspetti per saper come combatterli in entrambi i contesti, implementando sia soluzioni per limitarli, sia percorsi di riabilitazione adeguati a riportare le funzionalità fisiologiche a livelli accettabili.

- Bisogna ancora studiare un adeguata schermatura contro le radiazioni cosmiche e le particelle cariche che arrivano dal Sole e dalle altre stelle:

la Terra è costantemente protetta da un campo magnetico non-stazionario che intrappola tali particelle nella cosiddetta "bottiglia magnetica" grazie alle forze di Lorentz. Ma, usciti dal campo magnetico terrestre, sia gli umani, sia i computers risulterebbero vulnerabili alle radiazioni e alle tempeste magnetiche.

Basti pensare che con l'attuale tecnologia di schermatura, se si mandassero uomini su Marte, essi, tra molti altri problemi, arriverebbero completamente ciechi.

- Alterazioni nei cromosomi:

la rivista americana "Science" ha recentemente pubblicato i risultati di una ricerca sugli effetti della prolungata assenza di gravità e delle radiazioni spaziali su strumenti ed equipaggio i quali confermano che dopo 1 anno nello spazio ci sono anche gravi modifiche a livello genetico.

Sono state condotte ricerche sul genoma umano nello spazio grazie all'esperienza dei due astronauti gemelli della NASA, Scott Joseph Kelly e Mark Edward Kelly. Due individui con genoma identico, quindi. Rispettivamente, uno mandato nello spazio sulla I.S.S., l'altro rimasto sulla Terra. Le ricerche svolte in parallelo sui due soggetti hanno

dimostrato che la maggior parte delle modifiche al corpo sono reversibili e a distanza di 2 anni i parametri sono quasi completamente tornati alla normalità.

Tuttavia, i telomeri, strutture all'estremità dei cromosomi, la cui lunghezza è solitamente associata in modo direttamente proporzionale all'invecchiamento e alla malattia, hanno mostrato problemi più profondi. Quelli di Scott Kelly nello spazio si sono allungati, effetto del tutto inatteso, ma al rientro si sono accorciati in pochissimo tempo, risultando poi essere molto più corti di come erano prima del decollo.

Questo può causare problemi alle sue cellule, aumenta il rischio di tumori e malattie cardiovascolari. Inoltre, i geni che riparano il D.N.A. sono stati modificati così come il sistema immunitario.

Bisogna comunque specificare che, per quanto riguarda la maggior parte delle modifiche dello spazio sugli astronauti, il corpo umano appare "resiliente", ossia capace di recuperare molte delle sue caratteristiche pre-volo e di adattarsi con successo alle condizioni di microgravità, tuttavia, molti problemi si manifestano solamente al momento del ritorno in un ambiente con gravità, di conseguenza, solo durante il ri-adattamento.

L'apparato che subisce la maggior parte delle conseguenze del decondizionamento è il sistema nervoso, infatti gli astronauti al momento del rientro hanno seri problemi di equilibrio che sommato alla scarsa capacità di movimento non permettono una corretta riabilitazione del nostro corpo in tempi brevi.

L'apparato neuro-vestibolare è l'insieme di organi presenti nell'orecchio interno che è responsabile della percezione delle accelerazioni lineari che agiscono sul nostro corpo e dà al nostro cervello la sensazione di equilibrio. Tuttavia, durante la permanenza in un ambiente di microgravità, questo sistema può subire degli effetti negativi che compromettono la sua percezione dello spazio circostante.

I principali sintomi che si manifestano più di frequente sono la cinetosi, disorientamento, problemi di postura e movimento, principalmente essi sono dati dal fatto che il cervello non riesce più ad avere una concezione univoca di alto-basso, problemi di coordinazione occhio-mano e occhio-testa. Questi effetti sembrano persistere almeno fino a quando il soggetto non si sia adattato, purtroppo il tempo di adattamento è una variabile altamente soggettiva e pertanto non ci sono standard validi per tutti gli astronauti. Al momento del rientro sulla Terra si possono presentare nuovamente cinetosi aggiunta

ad un'illusione di moto nonostante il soggetto sia fermo, e in più i soggetti dimostrano di avere uno scarso equilibrio.

Siccome il cervello è la principale vittima di questi aspetti e le sue erranee interpretazioni poi vanno a ripercuotersi sul resto del corpo, gli astronauti non devono assolutamente avere alcun tipo di lesione, disturbo o problema neurologico, potenziale o attuale. Al fine di investigare questo aspetto nei membri delle varie missioni, l'equipaggio viene sottoposto ad attente analisi cerebrali tramite risonanze magnetiche ed elettroencefalogrammi sia prima che dopo la missione per analizzare eventuali cambiamenti.

Ovviamente, i momenti in cui gli astronauti sono maggiormente messi alla prova fisicamente è la fase in cui si passa da un ambiente gravitazionale ad un altro. Queste occasioni, tra l'altro, coincidono spesso con fasi di acuto stress dovuto al pilotare un modulo durante la fase di decollo e di atterraggio. Sfortunatamente, per ragioni tecniche, risulta impossibile prelevare i dati biometrici delle cavie durante queste fasi e, perciò, le uniche cose su cui possiamo fare affidamento sono le informazioni che gli astronauti possono fornirci in prima persona verbalmente. Il pregio di questa tecnica è che permette di capire quanto siano stati pesanti i sintomi per ciascun componente dell'equipaggio, il difetto è che si tratta comunque di sensazioni che dipendono dalle predisposizioni individuali di ciascun astronauta, sono estremamente soggettive e non suffragate da dati certi. Molte testimonianze possono essere dettate dall'emotività, specie se a sperimentarle sono i soggetti meno esperti e i neofiti, purtroppo rimane sempre presente una parte di imprevedibilità, nonostante i vari addestramenti e le varie simulazioni svolte anche a terra.

Bisogna, però, riportare che ciò che si evince dalle interviste svolte sugli astronauti è che le risposte alle domande standard sono state pressoché simili nel descrivere i sintomi presentati. I piloti che sono stati sottoposti a tali domande erano i 34 membri dell'equipaggio di uno Space Shuttle, 31 uomini, 3 donne. L'età media era di 42,1 anni. Le interviste sono state svolte entro 4 ore dal rientro [4].

Molti hanno provato una sorta di illusione di movimento dello spazio circostante durante il rientro e una volta usciti dal modulo essa veniva accentuata nei momenti in cui loro muovevano la testa. La seconda serie di domande si è, invece, concentrata sulle difficoltà del rimanere in piedi e camminare per uscire dal modulo.

Si è visto che sono presenti numerose similitudini tra gli effetti microgravità ed quelli che derivano dall'essere forzati a letto per molto tempo. Esse sono evidenti soprattutto nella misura in cui entrambe le condizioni producono gravi forme di osteoporosi ed atrofia muscolare. Infatti, viene a mancare la

fondamentale, e costante, applicazione di una forza meccanica, che si trova a svolgere il compito co-responsabile del corretto funzionamento dell'apparato locomotore.

Si è proposto di utilizzare delle cavie animali per svolgere esperimenti volti a far comprendere i reali meccanismi che queste circostanze provocano su una forma di vita abituata ad una accelerazione di gravità di livello terrestre. Sfortunatamente, come è ovvio ed intuibile, una sperimentazione animale risulta molto onerosa in termini economici, in quanto questa comporta la necessità di portare in orbita delle cavie su cui effettuare i test di laboratorio. Tuttavia la J.A.X.A.⁴ ha avviato dei programmi di ricerca sull'apparato locomotore dei topi inviando sulla sezione giapponese della I.S.S. degli habitat appositi per questi animali al fine di sottoporli ad un ciclo di sperimentazioni di livelli di accelerazioni di gravità ad 1g e 2g⁵. Il primo di questi test che utilizzano nello spazio una M.H.U.⁶ risale al 2016, la seconda al 2017 [5].

È apparso evidente che la gravità artificiale prodotta da queste centrifughe riesce a ridurre gli effetti della perdita di massa ossea.

Per 14 giorni i topi sono stati sottoposti ad un'accelerazione di 1g oppure di 2g, dopo 3 giorni si erano già adattati alla centrifuga sia in condizioni di gravità normale che di ipergravità. Nel gruppo sottoposto a 2g, il peso che i soggetti avevano perso è stato recuperato fino ad arrivare al 96% del peso che presentavano i soggetti del gruppo sottoposto a 1g. Avendo monitorato la quantità di cibo ed acqua ingerita dagli animali, si ipotizza che questa differenza di massa sia dovuta al fatto che le cavie del gruppo con 2g dovessero adattare il loro corpo ad un'accelerazione di gravità pari al doppio di quella a cui erano abituati.

⁴ **JAXA:** Japan Aerospace eXploration Agency

⁵ Si intende con 1g un'accelerazione di gravità pari a quella che si ha mediamente sulla superficie terrestre, con $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Con 2g, 3g, ecc. ecc. si intende rispettivamente un'accelerazione di gravità pari al doppio, al triplo, e via discorrendo, di quella terrestre

⁶ **M.H.U.:** Mouse Habitat Unit

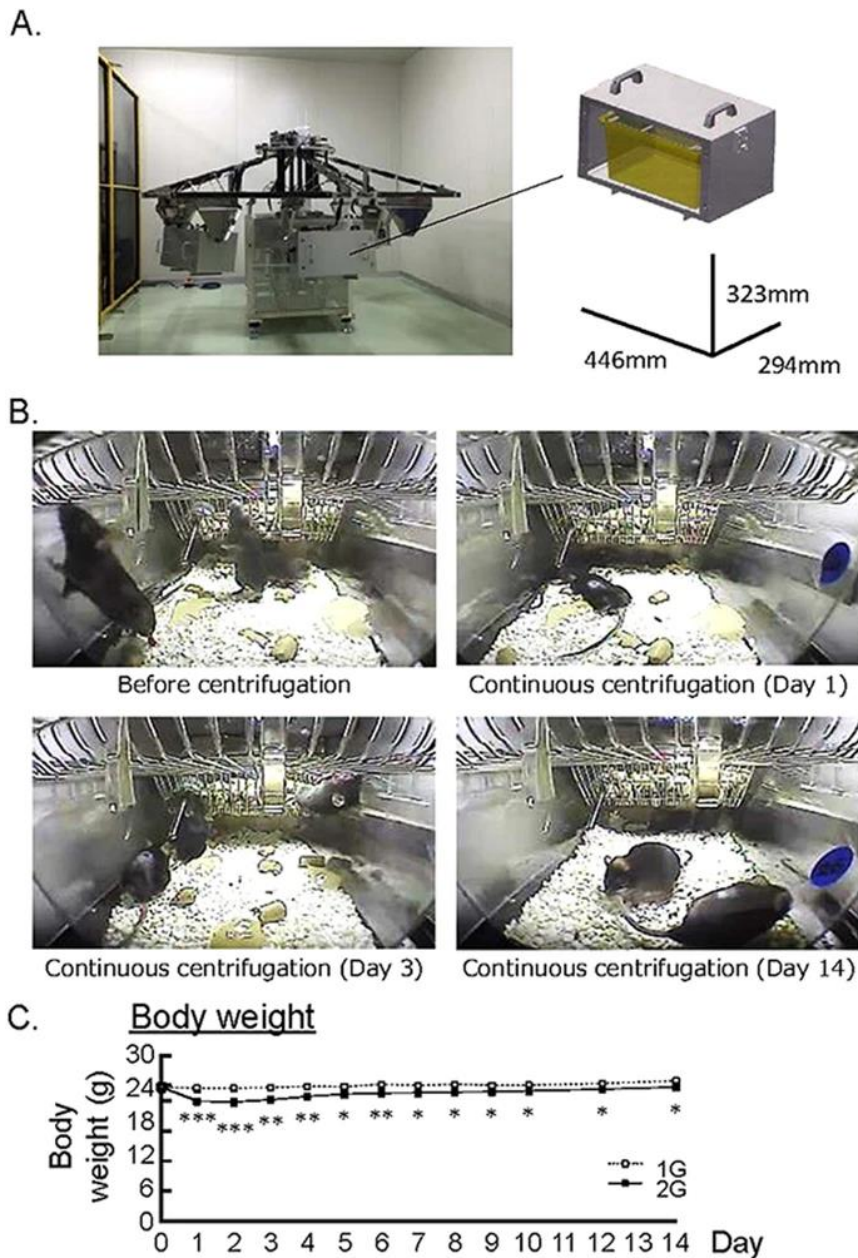


Fig. 2: Si vede le varie M.H.U. durante l'esercizio nelle condizioni di microgravità, gravità ed ipergravità prodotta da una centrifuga di raggio $R = 1m$. Si può visualizzare nel grafico sottostante l'andamento del peso corporeo delle cavie a seconda dell'accelerazione applicata.

Immagine tratta da [5].

Questa accelerazione anomala che il loro corpo ha subito, ha avuto come effetto aggiuntivo quello di causare un'ipertrofia muscolare e un rafforzamento delle ossa; questo perché i 2g hanno modificato la loro espressione genica del mRNA responsabile della miogenesi, ossia la formazione dei tessuti muscolari, incrementandola e sopprimendo la produzione del gene autofago, che causa la naturale degradazione dei muscoli non necessari al funzionamento normale del corpo.

Discorso analogo per le ossa: il gene del mRNA che produce tessuto osseo è stato potenziato, stimolandone una maggiore produzione e fortificando specialmente omero, femore, tibia e colonna vertebrale.

Considerando il caso opposto, ovvero con accelerazioni di gravità artificiale inferiori a 1g o, addirittura, con microgravità, come ci si aspettava, le dimensioni di muscoli ed ossa si sono notevolmente ridotte. Le variazioni di forza che agiscono sull'organismo sembrano comportare sempre un calo di massa corporea, dovuto ad un periodo di transizione ed adattamento del corpo alle nuove condizioni operative.

Date queste ultime considerazioni, si può evincere che, dopo una missione spaziale di media-lunga durata e, perciò, dopo un periodo sufficiente affinché il corpo si abitui all'habitat con microgravità, il momento del ritorno a Terra si rivela, quasi sempre, particolarmente traumatico; tanto che, considerando questo aspetto e l'importanza che sembra rivestire, un grande numero di studiosi che hanno focalizzato le loro ricerche sull'argomento della tolleranza ortostatica⁷, tende a condividere l'idea di "classificare" gli astronauti in 2 categorie: "finishers" e "non-finishers", in base al fatto che essi potessero o meno rimanere in posizione eretta, senza alcuna necessità di aiuto, per almeno 10 minuti [6].

Si vanno ora ad evidenziare le principali particolarità dei due gruppi e le loro differenze:

- Nel primo gruppo, i "finishers", anche chiamati "non-fainters"⁸, il valore medio della pressione arteriosa è mantenuto in un intervallo di valori con escursione massima, sia per eccesso che per difetto, dell'ordine dei 5 mmHg, corrispondenti a circa 666,612 Pa nel S.I.⁹, mentre passano da una posizione supina ad una eretta dopo il rientro dal volo spaziale, rispetto ai parametri pre-volo
- Viceversa, nei "non-finishers", o "fainters" ci sono state decrescite dei valori di pressione dell'ordine 10 o 20 mmHg. Il termine "fainter", in questo contesto è quindi da interpretare come caratteristica di persona che al momento del rientro può manifestare sintomi di pre-sincope

⁷ **TOLLERANZA ORTOSTATICA:** in ambito medico, si indica con la suddetta espressione la capacità del corpo di resistere ad un'accelerazione lineare e, quindi, di rimanere in posizione eretta senza aiuto e senza che il soggetto si muova

⁸ **FAINTER:** termine difficilmente traducibile in italiano, derivato dal verbo "to faint", ossia "svenire"

⁹ **S.I.:** Sistema Internazionale

Durante il cambio di posizione da supino ad eretto, per via dello stress ortostatico sul corpo, si verifica anche un aumento del battito cardiaco con conseguente crescita dell'output di sangue dal cuore accompagnato da un maggiore richiamo di esso dalle parti periferiche del corpo, come testa e arti. I "non-finishers" sono coloro che registrano crescite più significative rispetto ai parametri pre-volo, esse ascrivibili intorno a circa +23 battiti al minuto.

Le sperimentazioni svolte su umani con una centrifuga a medio raggio sembrano indicare che, imprimendo un'accelerazione lineare sugli astronauti, essi riportino delle variazioni dei parametri sopra elencati che si registrano essere più contenute rispetto a quelle analoghe per i soggetti esposti alla microgravità senza alcun supporto, in conseguenza del fatto che le forze apparenti causano sul loro corpo uno stress che permette di mantenere un funzionamento normale degli otoliti aumentando la tolleranza ortostatica quando si passa da una posizione supina ad una eretta al momento del rientro sulla Terra.

GRAVITA' ARTIFICIALE

COME POSSIBILE CONTROMISURA

Queste apparecchiature sperimentali presentano il difetto di avere costi notevoli.

Problematica che, purtroppo, comporta un sostanziale difetto di fondo di questa ricerca, ma comune a molte altre con il medesimo scopo: si può raccogliere solo un numero relativamente esiguo di dati, conseguenza del ridotto numero di soggetti che sono stati sottoposti al medesimo esperimento. Numero che, sfortunatamente, è destinato a scendere ancora quando si tratta di test con centrifuga svolti in orbita. Si aggiunge che la durata dell'esperimento è dell'ordine di alcuni minuti, questo vuol dire che il tempo per cui i soggetti sentono questa gravità artificiale è relativamente trascurabile rispetto alla durata di una vera missione di ricerca con equipaggio umano in condizione di microgravità, che solitamente dura diversi mesi.

Quindi, nonostante i risultati comunque positivi ed incoraggianti, rimangono ancora troppo pochi i dati raccolti, facendo sì che permangano molti dubbi e punti oscuri sull'effettiva messa in pratica di tali macchine per via delle loro conseguenze sul nostro corpo, anche se, per dovere di cronaca è giusto riportarlo, sono state tendenzialmente benefiche.

Tutte queste incertezze sono principalmente date dal fatto che, per le ragioni sopra riportate, non si possa essere sicuri con certezza statistica che essi siano macchinari con un accettabile margine di dannosità per un equipaggio umano scenario futuro, qualora ci fosse una loro applicazione in una missione in condizioni di microgravità.

Si deve anche aggiungere che la divisione degli astronauti in "finishers" e "non-finishers" potrebbe essere un'utile discriminazione in prima approssimazione, ma destinata a cadere in difetto man mano che si aumenterà la precisione degli studi sulla resistenza all'intolleranza ortostatica. Complice anche il fatto che i sintomi che uno stress ortostatico causa sul sistema cardiocircolatorio possono anche essere dovuti ad un'eccessiva esposizione o intensità o, ancora, ad una naturale predisposizione dello stesso piuttosto che ad una vera intolleranza. Per di più, un ulteriore difetto di questa divisione, che causa un problema ancora più subdolo, è l'eventualità che, in un momento futuro, possano emergere problemi anche in un "finisher", che, come si è detto, dovrebbe resistere per almeno un intervallo di tempo di 10 minuti.

Le difficoltà in queste persone, di conseguenza, si avrebbero in un momento posteriore al ritorno e non facilmente prevedibile, gestibile o, men che meno, analizzabile.

Un altro problema inatteso, ma che si presenta come sostanziale, è che emergono delle ulteriori distinzioni di sintomi e di criticità tra un corpo di una donna e di un uomo, sia durante il volo, sia al momento del rientro sulla Terra [1].

Le medesime ricerche utilizzate per la tolleranza ortostatica hanno condotto alla conferma che uomini e donne presentano alterazioni diverse in diversi aspetti del loro fisico:

- Le donne presentano una maggiore sensibilità per quanto concerne l'apparato cardiovascolare e patiscono di più al momento del rientro per un'intolleranza ortostatica più preponderante che negli uomini.
- Gli uomini, d'altro canto, dimostrano di soffrire di più di danneggiamento della vista e di variazioni nei parametri di pressione intracranica

Le prime mostrano una perdita in volume per quanto riguarda la quantità di plasma nel sangue e soffrono maggiormente di una significativa decrescita nel battito cardiaco, si è inoltre visto che sulla Terra il loro corpo tende a mostrare come risposta in caso di stress o di uno sforzo anormale, un aumento del battito cardiaco. Parallelamente gli uomini, a parità di sollecitazione esterna applicata, rispondono con una crescita della resistenza vascolare. Questo ha portato a concludere che le donne possiedono un metabolismo che rende più difficile la regolazione del fisico ad uno sforzo ortostatico, rendendole più sensibili e quindi più probabilmente ascrivibili nella categoria di “non-finishers”.

Gli astronauti che non si sono dimostrati in grado di superare la prova dei 10 minuti, che consiste nella discriminante tra i due gruppi, sottoponendosi ai controlli medici hanno dimostrato un anomalo aumento della vasodilatazione nel cervello. Si sono viste delle significative differenze di genere: 5 soggetti su 8 che si sono dimostrati “non-finisher” erano donne, mentre 17 su 19 “finishers” erano maschi.

Questo risultato è causato dal fatto che negli individui femminili la secrezione dell'ormone responsabile del mantenimento della pressione sanguigna entro limiti accettabili non è così preponderante come negli individui maschili, il che porta a concludere abbastanza certamente che le donne soffrono, almeno mediamente, di più dell'intolleranza ortostatica rispetto ad un omologo maschile. Chiaramente è consigliabile avere molti campioni appartenenti ad entrambi i sessi per poter

esprimere con più certezza delle conclusioni, dato che si hanno ancora troppe poche informazioni sul genere femminile rispetto a quello maschile per la nettamente minore presenza femminile in campo astronautico. I dati raccolti solamente per questa ricerca riguardano 140 astronauti uomini e solo 25 donne.

D'altro canto la decrescita di massa nel cuore tra ventricolo destro e sinistro si dimostra simile nei due sessi, come evidenziato dalle ecocardiografie e dalle risonanze magnetiche, durante varie simulazioni di volo in condizioni di microgravità realizzate anche con 60 giorni di inattività. Esercizi fisici hanno dimostrato che questi ultimi possono essere usati come contromisura efficace per entrambi i sessi, utile a controllare la riduzione di massa ventricolare nel miocardio minimizzando le complicanze.

Tuttavia, nelle simulazioni di microgravità realizzate con immersioni in acqua della durata di circa 6 ore, si è ulteriormente confermato che il limite di tolleranza ortostatica negli uomini è mediamente maggiore che nelle donne, inoltre, esse presentavano una più grande decrescita del meccanismo adito a controllare la pressione sanguigna fino ad un livello quasi costante, noto come sensibilità baroriflessa. Si può anche notare come nonostante ci fosse una vasodilatazione più lenta per un'improvvisa riduzione della pressione sanguigna nelle donne più sensibili all'intolleranza ortostatica, l'autoregolazione cerebrovascolare non è stata danneggiata nelle donne.

Si è già fatto cenno alla possibilità del turismo spaziale e dello sfruttamento a scopi più direttamente commerciali ed economici di quelli che si potrebbero intravedere ora dando uno sguardo distratto e superficiale alla cosiddetta "Space economy", il che porta con sé l'implica idea che la zona alta della atmosfera, l'esosfera, e lo spazio esterno ad essa saranno zone sempre di più frequentate da individui che non hanno, neanche lontanamente, compiuto un addestramento agli stessi livelli di quello degli attuali astronauti.

Se si vuole che questo settore decolli e sia più accessibile ad un numero sempre maggiore di utenti possibili, e non solo ai pochi eletti che possiedono ingenti quantità di denaro da potersi permettere un faraonico biglietto, si deve prima di tutto acquisire un'elevata quantità di conoscenze delle reazioni del corpo di un umano "normale" alle stesse sollecitazioni a cui sono sottoposti gli astronauti addestrati.

È lo stesso principio per cui la nave o l'aereo sono usati per muovere persone che non sono necessariamente marinai, macchinisti o aviatori. Analogamente, per spostarsi verso nuove stazioni spaziali, i passeggeri che, inevitabilmente, presto o tardi, useranno le macchine che, per ora, si stanno

solo studiando, potranno farlo senza bisogno di essere ingegneri, fisici e, soprattutto senza che abbiano avuto un addestramento da piloti dell'aeronautica militare.

È interessante, perciò, vedere come tali potenziali utenti reagiranno:

- Uno studio che coinvolge 65 uomini e 12 donne, tutti con età compresa tra i 22 e gli 88 anni, ha dimostrato che l'annebbiamento visivo e i picchi di battito cardiaco sono inversamente proporzionali all'età
- Allo scopo di analizzare gli effetti negativi dell'intolleranza ortostatica, un altro studio, che coinvolge 22 uomini e 25 donne, ha mostrato come il corpo di queste persone ha reagito in risposta ad uno stress generato da una centrifuga Ames della NASA, studiando in particolare la riduzione di plasma nel sistema cardiocircolatorio

Il risultato che si può evincere da queste ricerche è che la tolleranza ortostatica degli uomini, con 13 soggetti su 16, è mediamente più alta di quella delle donne, con 7 soggetti su 15.

Con un adeguato addestramento la resistenza di entrambi i generi sembra aumentare fino a valori simili, in special modo per quanto riguarda le donne grazie ad una adeguata sessione di gravità artificiale.

I miglioramenti sono stati molti, tra cui uno dei più significativi è stato nell'output di sangue dal ventricolo grazie un maggior volume sistolico, ossia il volume di sangue che ciascun ventricolo pompa durante la sistole¹⁰, esso cresce in modo direttamente proporzionale alla forza con cui il ventricolo si contrae. I vari studi portati a termine hanno mostrato che, con un trattamento ad intensità crescente di gravità artificiale, si sono registrati grandi miglioramenti per quelle persone che, al principio dell'addestramento mostravano sintomi di ipovolemia¹¹, ovvero la significativa decrescita di volume di sangue circolante nel corpo, al cessare delle simulazioni.

Alla fine dell'esperimento le conseguenze che si sono viste, sono state un aumento del limite di tolleranza ortostatica delle cavie.

Negli uomini, questo sembra essere causato dalla decrescita del valore medio di pressione del sangue a riposo, parallelamente si è verificato un aumento dell'output di sangue dal cuore, sia in

¹⁰ **SISTOLE:** fase di contrazione del cuore

¹¹ **IPOVOLEMIA:** fenomeno che consiste in una significativa decrescita in volume di sangue circolante nel corpo.

Normalmente causata da emorragie o perdite di liquidi corporei, qui è dovuta ad anomale distribuzioni di sangue per la microgravità

condizioni a riposo che durante il test della tolleranza ortostatica con esposizione a gradienti di gravità artificiale. Va aggiunto che nelle donne che hanno mostrato sintomi di ipovolemia, oltre agli effetti benefici già evidenziati, si deve considerare anche un funzionamento migliorato nei meccanismi responsabili del mantenimento a pressione quasi costante del sangue in seguito all'applicazione di un gradiente di gravità artificiale lungo gli assi di riferimento del sistema "corpo umano".

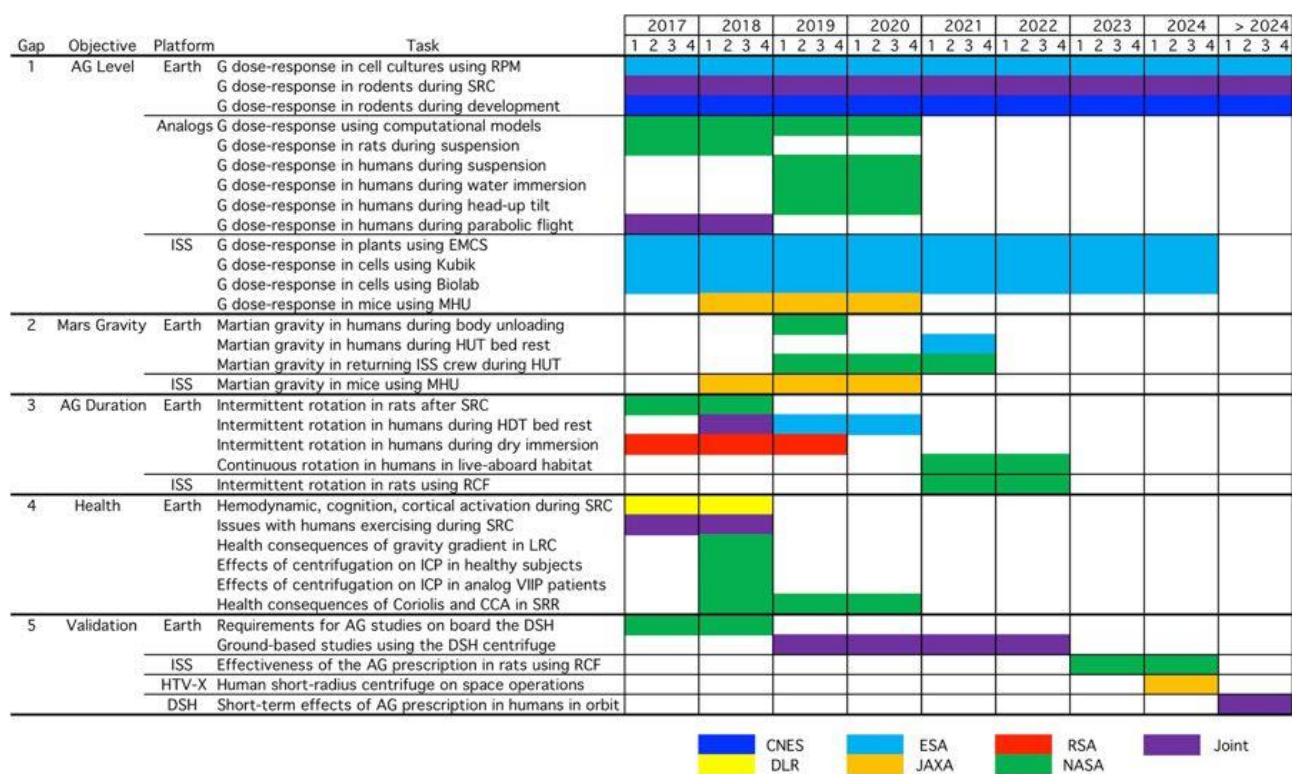


Fig. 3: Diagramma riepilogativo degli studi passati e futuri, in solitaria o congiunti, di alcune tra le più importanti agenzie spaziali. Si notino come i prossimi sviluppi (gestite da collaborazioni anche extraeuropee) delle tecnologie riguardo la gravità artificiale siano programmati almeno fino al 2024.

Immagine tratta da [7].

In conclusione, senza particolari distinzioni di genere, la sottoposizione ai test sulla gravità artificiale ha avuto come conseguenza un netto miglioramento della tolleranza ortostatica dei soggetti decondizionati¹² e della loro funzione baroriflessa¹³. Il decondizionamento è da interpretarsi come conseguenza inevitabile della mancata attività fisica dovuta all'assenza di gravità che porta a

¹² **DECONDIZIONAMENTO:** esso è definibile come una progressiva diminuzione, sia in frequenza che in intensità, della risposta della mente o, come in questo caso, del corpo nel suo complesso, ad uno stress esterno.

¹³ **BARORIFLESSO:** uno dei molteplici meccanismi omeostatici che servono a mantenere i valori di pressione del sangue ad un livello che si può considerare come costante

disperdere quei benefici, traducibili principalmente in resistenza ed aumento della già trattata tolleranza avutisi come risultato dell'addestramento.

Al momento del rientro sulla Terra, coloro che hanno subito questa sessione di allenamento si dimostrano più resistenti e, molto probabilmente, risulteranno ascrivibili nella categoria di "finishers". D'altro canto, le caratteristiche dove le differenze di genere si percepiscono maggiormente sono la decrescita di pressione sanguigna che si ha negli uomini a differenza delle donne, successivamente all'esposizione alla gravità artificiale.

Sebbene questi test a gravità artificiale siano in grado di aumentare la tolleranza e combattano il decondizionamento sia nelle persone che possiedono un regolare afflusso di sangue sia in coloro che ne presentano uno eccessivamente basso, gli ipovolemici quindi, sembra che le contromisure attuali non riescano appieno nell'intento di costituire un'unica soluzione al suddetto decondizionamento cardiovascolare.

La nostra principale mancanza sono che non si è ancora riuscito a capire se le soluzioni ora utilizzate siano sufficienti a preservare l'integrità del fisico degli astronauti mentre sono in orbita, cosicché al momento del rientro non debbano patire eccessive controindicazioni [1].

La gravità artificiale consiste nell'utilizzare una sorgente capace di imprimere ad un generico corpo un'accelerazione lineare. In un ambiente di microgravità questo permette di avere per l'equipaggio e per il cargo contenuto dal modulo una simulazione di un campo di forza che supplisce alla gravità terrestre.

Gli esseri umani, come ogni altro animale del pianeta, si sono sviluppati ed evoluti immersi in un campo di forza gravitazionale che produce un'accelerazione circa costante per tutta la superficie della Terra del valore di $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Questo permette, tra altre cose, di mantenere i muscoli e le ossa dell'apparato locomotore sotto sforzo continuo, impedendone l'atrofizzazione.

Nello spazio questo viene a mancare e il gene autofago a questo punto fa ridurre in volume i muscoli che non servono al normale funzionamento del corpo, in modo che le energie assimilate dal nostro corpo non vengano impiegate in zone del corpo in cui non c'è necessità.

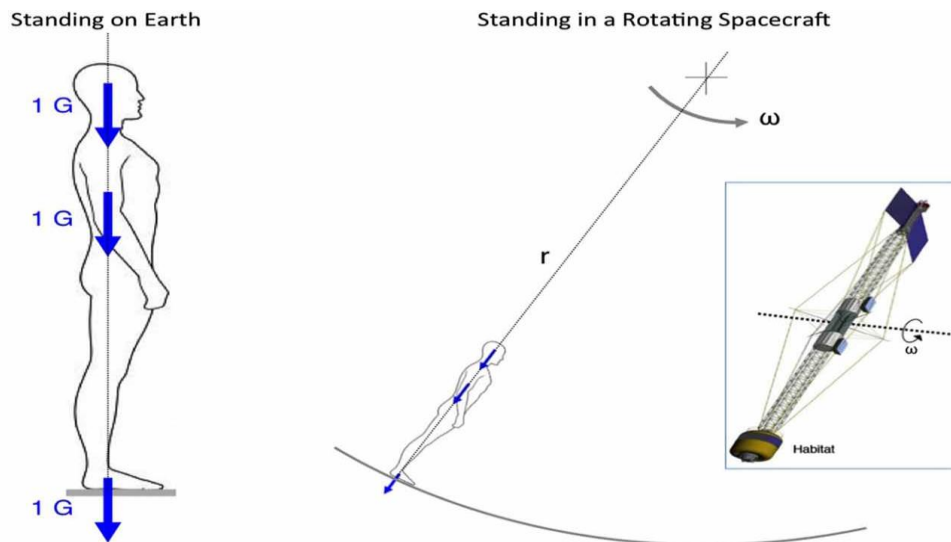


Fig. 4: Le due configurazioni qui riportate mettono a confronto i due casi particolari in cui si è in posizione eretta sulla Terra e in cui si è all'interno di una centrifuga di grande raggio, in questa configurazione anche coincidente con la nave stessa.

Immagine tratta da [3].

La conseguenza di ciò è un deterioramento e una generale ipotrofia dell'apparato locomotore. La gravità artificiale dovrebbe impedire che questo decondizionamento comprometta il corretto funzionamento del nostro corpo e dovrebbe rendere il momento del rientro sul pianeta Terra meno traumatico per gli astronauti di quanto lo sia ora.

Finora le ricerche in questo campo si sono concentrate su come sia possibile generare un'accelerazione lineare senza eccessiva complessità progettuale, la quale comporterebbe anche dei costi maggiori e più alte probabilità di errore. La risposta che, per adesso, sembra avere indicato quale sia la via più praticabile è una centrifuga a corto raggio ($R = 1-3$ m circa) a funzionamento intermittente [3].

Le sue dimensioni radiali così ridotte sono essenziali per poter adoperare questa macchina negli spazi ristretti dei moduli spaziali. L'astronauta viene messo all'interno, vincolato in modo che il suo unico grado di libertà si limiti ad essere in direzione tangenziale; la sua testa è rivolta verso il centro di rotazione e i piedi verso l'esterno. In questo modo l'accelerazione che il soggetto sente è solo in direzione radiale lungo la spina dorsale. Queste soluzioni combinate con l'attività fisica dovrebbero essere in grado di ridurre il decondizionamento, almeno fino a limiti accettabili.

Dall'aprile a maggio del 1998 NASA ha condotto delle sperimentazioni umane sugli effetti delle accelerazioni centripete per simulare la gravità a livelli terrestri. Durante un volo in partenza dal

Johnson Space Center di Houston, i quattro soggetti prescelti per il test sono stati sottoposti, pertanto, ad una accelerazione di 1g generata da una centrifuga installata sul modulo Spacelab [3].

Si sono raccolti i vari dati sulle cavie prima e dopo la fase di volo. Sono stati eseguiti vari test diagnostici sui membri dell'equipaggio, i dati più importanti sono quelli che riguardano frequenza cardiaca, valori medi di pressione arteriosa e venosa durante le fasi di sistole e diastole¹⁴. Queste misurazioni vengono effettuate con degli elettrodi ad impedenza con lo scopo di monitorare le variazioni in comportamento e in spostamento dei fluidi.

Il modulo prevedeva di posizionare i soggetti seduti, con la testa fissata in un dato assetto e il corpo che poteva trovarsi disposto nelle due possibili modalità: “left-ear out (L.E.O.)” oppure “right-ear out (R.E.O.)”. Il centro della testa risultava essere distante 0,5 m dall'asse di rotazione, questo assetto faceva sì che l'asse-corpo lungo il quale l'accelerazione centripeta fosse diretta, fosse parallelo alla colonna vertebrale e che, quindi, agisse nella stessa direzione e nello stesso verso di quella che si sarebbe avuta in ambiente di gravità, che è il caso che si verifica normalmente sulla Terra.

Tra coloro che hanno preso parte a questo test, due soggetti sono stati esposti anche ad un'accelerazione pari a 0,5g.

Quando ci si trova in condizioni a “riposo” sulla Terra, i vari fluidi del corpo umano hanno una posizione quasi baricentrica.

L'esperimento prevedeva di verificare come gli stessi si muovono dalla loro posizione iniziale in corrispondenza del torace, verso le estremità inferiori del corpo umano a causa di una forza esterna anomala o ad una differente inclinazione in cui vengono posizionate le cavie. Le rilevazioni sono state possibili grazie alle variazioni di impedenze nei soggetti registrate dagli elettrodi, esse sono state causate dai moti dei fluidi sopra riportati. Si pone particolare attenzione a queste variazioni perché esse sono un indicatore delle risposte del nostro fisico allo stress ortostatico a cui esso è sottoposto .

Gli elettrodi utili ad effettuare le misurazioni sono stati posizionati nel seguente modo:

- Un elettrodo sul collo
- Quattro elettrodi sono stati posti in corrispondenza dell'asse principale del corpo, lungo la spina dorsale

¹⁴ **DIASTOLE:** fase di rilasciamento del cuore

- Due elettrodi nel lato sinistro della gabbia toracica
- Tre elettrodi sulla gamba sinistra: uno sulla coscia sinistra, il secondo sul muscolo del polpaccio e l'ultimo sul dorso del piede
- Due elettrodi vennero messi sulla fronte

L'impedenza veniva misurata facendo passare una corrente alternata a bassa intensità ($i = 0,7 \text{ mA}$ con una frequenza di $\nu = 37 \text{ kHz}$) in una prescelta zona del corpo del soggetto [8]. Le variazioni nella caduta di tensione, registrate ai capi degli elettrodi permettevano poi di calcolare gli spostamenti dei fluidi e il loro contenuto nelle varie zone del corpo grazie ad una relazione analoga alla "2° legge di Ohm".

Assumendo che in una parte del corpo umano sia presente un dato volume V di fluido con una resistività nota, allora esso avrà un andamento inversamente proporzionale secondo la relazione $V \sim 1/R$ rispetto alla resistenza R , all'aumento del fluido di valore ΔV ol:

$$\Delta V_{\text{ol}} = L^2 * \rho_{\text{eff}} / \Delta R$$

ΔV : variazione del volume di fluido

ΔR : variazione nel valore di resistenza

ρ_{eff} : resistività del fluido considerato

L : lunghezza di riferimento della zona di cui si vuole calcolare l'impedenza

Si sono, infine, analizzate separatamente le molteplici variazioni ΔV ol delle varie zone del corpo dei soggetti, con particolare attenzione per il torace, addome, coscia e polpaccio [6].

Durante il volo, le variazioni di impedenza hanno mostrato che i fluidi corporei presenti nel torace si sono spostati verso l'addome e in misura minore verso gli arti inferiori. C'è stato un assembramento di fluido nella zona delle gambe.

Nella fase di pre-volo, il test di stimolazione ortostatica passiva ha permesso di analizzare la frequenza di battiti del cuore al minuto e la pressione delle arterie nel passaggio dalla posizione sdraiata dell'astronauta, detta anche clinostatismo, alla posizione eretta, o ortostatismo. Quest'ultimo

ha evidenziato una variazione nella quantità media di fluido nel torace di $\Delta Vol = -0,52 \pm 0,05$ litri rispetto alla posizione supina del soggetto [6].

Similarmente a quanto accade per il passaggio da una posizione supina ad una eretta, anche durante il test diagnostico, per l'incremento di stress ortostatico, si verifica un aumento del battito cardiaco nel soggetto. Il sangue deve venire pompato con più forza per permettere al nostro organismo di resistere al maggiore sforzo che l'ambiente ci impone.

I risultati che si sono trovati per le cavie di questi esperimenti sono pressoché simili come ordine di grandezza: ritornando alla definizione della suddivisione di “finishers” e “non-finishers”, nella prima categoria il sopraindicato aumento dall'essere supino ad eretto veniva mediamente a ricadere intorno a circa 17 BPM¹⁵ nella fase di pre-volo. Per quanto riguarda il test di stimolazione ortostatica passiva i valori di tale aumento per il giorno dell'atterraggio sono anche maggiori, ascrivibili a 33 BPM. Per i “non-finishers”, a parità di sollecitazione e di condizioni in genere, si sono registrati variazioni con scostamenti maggiori rispetto a quelle che si sono avute in media per i “finishers”: al giorno dell'atterraggio, rispetto ai valori per-volo hanno mostrato un aumento di circa 24 BPM.

Come risultato finale dell'esperimento, si può evincere che quelli tra le cavie che sono stati sottoposti alla forza apparente generata dalla centrifuga per supplire alla gravità durante il volo, hanno mostrato valori relativamente normali di pressione sanguigna e di battito del cuore, non solo nella fase di crociera, ma, ancora più importante, al momento del rientro. D'altra parte, considerando i due astronauti che non sono stati esposti a tale gravità artificiale, solo uno ha mostrato una significativa perdita di fluido a livello toracico il giorno dell'atterraggio. In ogni caso, nell'esperimento descritto l'incidenza dell'intolleranza ortostatica sull'equipaggio umano si è dimostrata in gran modo ridotta rispetto a precedenti ricerche per merito della centrifuga; sono comparsi sintomi di intolleranza ed anomalie dovute ad uno stato di pre-sincope solamente in coloro che non hanno subito il trattamento con la centrifuga.

Nonostante questi risultati siano incoraggianti, bisogna comunque procedere con la dovuta cautela, richiesta dal fatto che il numero di esseri umani coinvolti in tale sperimentazione sia, comunque, relativamente basso. Per ora, si sono solo incominciati ad intravedere i futuri benefici che l'applicazione pratica di questa tecnologia porterà nel campo dell'esplorazione spaziale. Tuttavia, prima ancora di porsi scrupoli sull'effettiva fattibilità di questi progetti da un punto di vista strettamente economico, ci sono ancora varie ragioni per procedere con molta cautela.

¹⁵ **BPM:** Beats Per Minute (battiti al minuto del cuore)

Esse riguardano, soprattutto, difficoltà di carattere progettuale, in particolare nell'implementazione di queste tecnologie a bordo di veicoli spaziali.

Una peculiarità di usare forze centrifughe per avere una simulazione di gravità è che, durante la rotazione, si genera un'accelerazione apparente dovute alle forze apparenti che agisce lungo un asse eccentrico. Per generare un'accelerazione che, come abbiamo evidenziato, deve essere almeno pari a $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ per ridurre gli effetti negativi sull'apparato locomotore e cardiovascolare principalmente, si deve innanzitutto, stabilito il valore di accelerazione normale che vogliamo andare a sviluppare, decidere quale parametro utilizzare come variabile indipendente e quale come variabile dipendente. A questo scopo, si effettuano ora dei richiami sui principi base che regolano i moti relativi e i moti circolari:

Si assuma che un punto generico di massa m descriva una traiettoria circolare avente raggio $\mathbf{r} = R\mathbf{u}_n$ con modulo $|\mathbf{r}| = R = \text{cost}$ centrata in un generico punto O all'origine di un sistema di riferimento inerziale e che un secondo sistema di riferimento non inerziale, con il medesimo punto O come origine, sia libero di ruotare rispetto al primo intorno al punto O , ma non di traslare.

I parametri specifici di questo moto sono la variabile angolare generica $\theta(t)$ (misurata in radianti [rad]), la velocità angolare $\omega(t) = \partial\theta(t)/\partial t$ (misurata in [rad/s]) e l'accelerazione angolare $\alpha(t) = \partial\omega(t)/\partial t = \partial^2\theta(t)/\partial t^2$ (misurata in [rad/s²]). In variabili lineari:

- Spostamento $\mathbf{s} = R \theta(t) \mathbf{u}_T$

- Velocità $\mathbf{v} = R \omega(t) \mathbf{u}_T$

- Accelerazione $\mathbf{a} = R\alpha(t)\mathbf{u}_T - R\omega(t)^2\mathbf{u}_N$ dove:
 - $\mathbf{a}_N = - R\omega(t)^2\mathbf{u}_N$ è l'accelerazione centripeta

 - $\mathbf{a}_T = R\alpha(t)\mathbf{u}_T$ è l'accelerazione tangenziale, che nelle condizioni di regime assumeremo nulla in quanto servirà avere la velocità angolare $\omega(t) = \text{cost}$, per garantire una accelerazione \mathbf{a}_N , normale alla traiettoria circolare, costante in modulo.

Il fatto che coloro che si trovano all'interno della macchina percepiscano un'accelerazione centrifuga, ossia con il versore " \mathbf{u}_N ", che parte dal centro O della circonferenza di raggio R e punta all'infinito, come positivo e non centripeta, ossia con un versore " $-\mathbf{u}_N$ ", diretto verso il

centro O della circonferenza, è dovuto al fatto che la misurazione viene effettuata da un sistema in cui non vale il principio di inerzia e, pertanto, è necessario inserire dei termini correttivi.

Tralasciando la dimostrazione della formula successiva, ipotizzando di effettuare una misurazione dal sistema di riferimento non inerziale l'accelerazione assoluta del punto che si muove lungo la circonferenza sarebbe:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_{rel} + \mathbf{a}_{trasc} + \mathbf{a}_{Co}$$

dove:

- \mathbf{a}_{rel} accelerazione relativa, ovvero quella con cui il corpo puntiforme si muove all'interno del sistema di riferimento non inerziale
- $\mathbf{a}_{trasc} = \boldsymbol{\alpha}(t) \times \mathbf{r}' + \boldsymbol{\omega}(t) \times (\boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{r}')$ accelerazione di trascinamento, ovvero quella con cui si muove il sistema di riferimento non inerziale rispetto a quello inerziale. Dopo la fase di accelerazione per arrivare alla velocità $\boldsymbol{\omega}(t)$ di regime, il seguente termine si riduce a:

$$\mathbf{a}_{trasc} = \boldsymbol{\omega}(t) \times (\boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{r}')$$

Il vettore \mathbf{r}' identifica la distanza del corpo puntiforme dal centro del sistema non inerziale. Dato che, in questo caso particolare, i due sistemi si trovano ad avere l'origine in comune, \mathbf{r}' si trova a coincidere con \mathbf{r} che è il vettore-distanza rispetto all'origine del sistema inerziale
- $\mathbf{a}_{Co} = 2(\boldsymbol{\omega}(t) \times \mathbf{v}')$ accelerazione di Coriolis, fenomeno non intuitivo che compare nel momento in cui ci sono dei sistemi non inerziali che ruotano rispetto ad uno inerziale. Anche sulla Terra compaiono questi effetti, il caso più famoso di osservazione di essi è, ovviamente, il pendolo di Foucault

Assumendo che il corpo puntiforme si muova solidale al sistema di riferimento non inerziale, esso percepirà una forza apparente $\mathbf{F}_{app} = \mathbf{F} - \mathbf{F}_{trasc} - \mathbf{F}_{Co}$ che gli imprimerà un'accelerazione relativa pari a:

$$\mathbf{a}_{rel} = \mathbf{F}_{app} / m = \mathbf{a} - \mathbf{a}_{trasc} - \mathbf{a}_{Co}$$

Nell'ultima espressione la forza centripeta compare come negativa e quindi tendente ad allontanarsi dal centro, questo moto si traduce nella forza centrifuga che andrà effettivamente a supplire alla gravità.

Per sopperire alla mancanza di osservazioni dirette degli effetti e delle modifiche che possono essere indotte sul nostro fisico dalla gravita artificiale applicata in una missione di breve, medio o lungo termine, si è pensato di studiare modelli matematici che, in prima battuta riproducano virtualmente questi fenomeni e le reazioni del nostro corpo.

Molti di questi modelli sono stati sviluppati in seguito alle osservazioni degli effetti delle missioni reali o sono nati in seguito alla formulazione di teorie che spiegassero i sintomi che si riscontravano sul nostro corpo al momento del rientro. Applicandoli, si possono studiare gli innumerevoli aspetti dell'argomento, come cambi di postura indotti dalla microgravità, conseguenze e modifiche nei fluidi del corpo in seguito ad inclinazioni durante l'inattività o le variazioni di pressione nelle estremità inferiori quando si è sottoposti ad una centrifuga [8].

Concentrandosi sul sistema cardiovascolare si deve disporre di un grande numero di “comparti” per simulare le variazioni di pressione indotte dal battito cardiaco, le perdite di carico nell'apparato venoso ed arterioso. Il modello che si andrà ora ad esplicitare, ha suggerito una divisione in 21 comparti per analizzare le modifiche di breve termine, dell'ordine di 5 minuti, per studiare ciò che è stato precedentemente descritto.

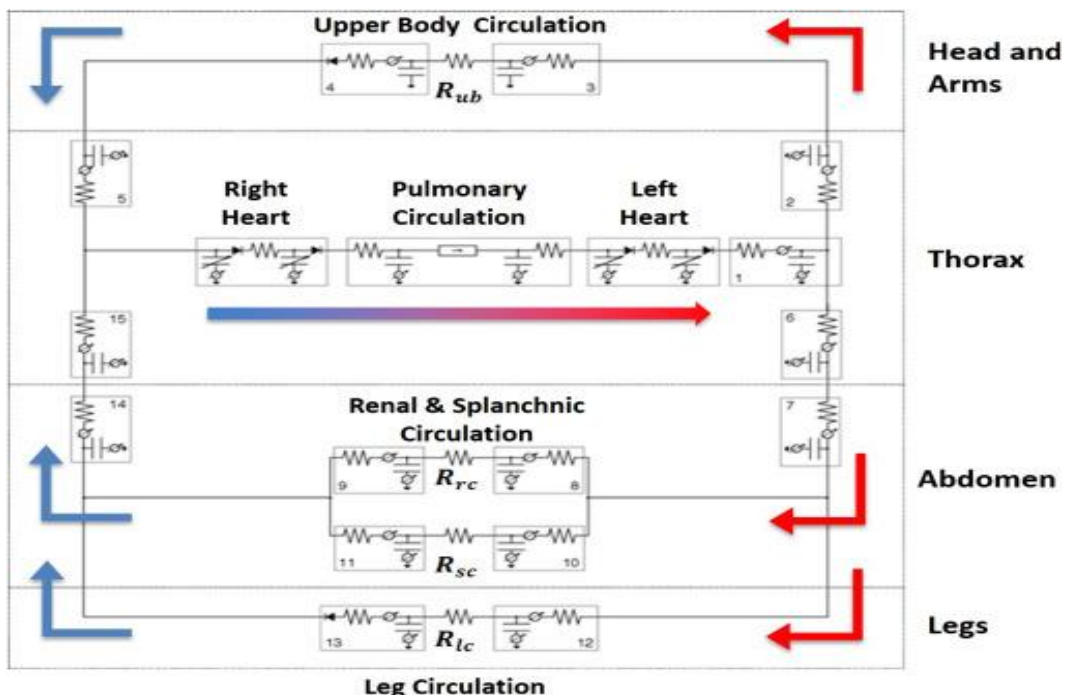


Fig.5: Schema riepilogativo del modello a 21 compartimenti. Al fine di simulare le perdite di carico le perdite di carico nei vasi sanguigni, per comodità le si assume concentrate localmente in quattro resistenze microvascolari. Esse sono: corpo superiore R_{ub} , reni R_{rc} , intestino R_{sc} e gambe R_{lc} .

Immagine tratta da [8].

Si basa sostanzialmente sul creare una analogia tra il sistema cardiovascolare e un circuito elettrico.

I suoi creatori hanno pensato di fare ricorso ad una divisione di esso in ventuno compartimenti:

- diciassette simulano il sistema vascolare, diviso a sua volta in quindici comparti per la grande circolazione verso le varie zone del corpo e due per la piccola circolazione diretta invece ai polmoni
- quattro vengono usati per quello cardiaco; essi indentificano macroscopicamente le zone che costituiscono le principali “utenze” del flusso di sangue: l’insieme di testa e braccia, il torace, l’addome e, infine, le gambe.

Questa è la struttura base teorica del modello su cui la teoria è stata strutturata nella fase di implementazione [8].

Tuttavia, esso stato, successivamente modificato e migliorato in sede di sperimentazione per poter garantire un’efficace simulazione per prevedere i vari effetti e reazioni che il sistema cardiovascolare subisce sotto un anomalo stress gravitazionale o, più in generale, un’anomala accelerazione lineare applicata lungo uno dei nostri assi-corpo principali.

Esso si basa sostanzialmente su un’analogia elettrica, ogni comparto viene studiato come un’utenza dotata di una resistenza elettrica equivalente R in cui una differenza di potenziale V , che fa le veci di una differenza di pressione dp/dz (dove l’asse z identifica la direzione assiale del flusso di sangue) tra monte e valle della condotta, scorre una determinata corrente “ i ”, che simula la portata in massa $m' = dm(t)/dt = \rho Av$ (dove “ A ” è la sezione che localmente viene attraversata dal flusso nell’istante $t = t^*$ con una data velocità di modulo “ v ” e dove “ ρ ” è la densità che il sangue possiede nel medesimo istante, essa può variare in seguito alle variazioni in volume di plasma indotte dalla microgravità). Le resistenze e gli altri componenti elettrici quali induttori o condensatori verranno poi connessi in serie o in parallelo al fine di descrivere, tramite la loro impedenza, un sistema di equazioni differenziali del primo ordine.

In esse verranno descritte le tre diverse fasi della circolazione del sangue nel momento in cui esso arriva alle utenze, ossia le arterie, che costituiscono la mandata di sangue carico di ossigeno da cedere alle cellule, i capillari e le vene, che costituiscono il ritorno di sangue carico di anidride carbonica verso il cuore.

Supponendo di valutare le modifiche che la gravità artificiale generata da una centrifuga induce su tale meccanismo e che il soggetto sia posizionato all'interno della macchina in modo che le accelerazioni indotte dalle forze apparenti vadano verso le gambe, l'effetto che appare più evidente è, ovviamente, quello di causare in media uno spostamento di sangue dal cervello e dalle braccia verso gli arti inferiori del corpo con conseguente aumento di battito cardiaco. Questo porta ad un crollo del parametro R del comparto "gambe", ma causa una sostanziale ipovolemia nella zona baricentrica del corpo.

Per capire come combattere l'eccessivo effetto negativo che si è registrato, sono stati condotti degli esperimenti che hanno mostrato come l'esercizio fisico ha la capacità di normalizzare il battito cardiaco e controbilanciare gli effetti della centrifuga. Questo modello risulta efficace anche per descrivere in prima approssimazione come funzionano l'apparato endocrino, renale ed intestinale e come il sangue si venga ripartito tra le varie componenti dei sistemi in diversi contesti.

In particolare nel comparto venoso, molte volte si manifestano fenomeni che non hanno un andamento lineare: siccome in condizioni normali sulla Terra, quando ci si trova in posizione eretta, il sangue lungo il circuito venoso deve compiere dislivelli che aumentano l'energia potenziale del fluido, esso viene aspirato e non pompato dal cuore e per far sì che il flusso non si inverta nella fase di diastole, ritornando indietro, le vene sono provviste di valvole di non ritorno che in un circuito elettrico vengono modellizzate da un diodo [8].

Un meccanismo simile è presente anche all'interno del cuore e permette di mettere in comunicazione i due atri con i rispettivi ventricoli, il passaggio attraverso tali valvole comporta, ovviamente, anche una perdita di carico assimilabile ad una resistenza maggiore. E in un eventuale grafico dell'andamento della portata m' , esso presenterebbe un andamento non lineare.

Tale meccanismo deve essere sempre garantito entro certi limiti per permettere di avere un funzionamento normale dell'apparato cardiocircolatorio, quindi per avere un continuo e sufficiente afflusso di ossigeno e nutrienti nelle varie parti del corpo e per poter eliminare gli scarti dell'attività cellulare. Pertanto, bisogna essere provare sperimentalmente che la centrifuga, o altri sistemi per la gravità artificiale, non compromettano eccessivamente il funzionamento di questo e degli altri apparati a causa degli stress ortostatici fuori norma. Bisogna inoltre assicurarsi che non si superino i

limiti di accelerazione lineare che impediscono di causare problemi al nostro corpo dettati da un'eccessiva pressione sul sistema osseo, ciò potrebbe tradursi in un periodo di adattamento più lungo, qualora esso sia possibile.

La pressione esterna è, per di più, responsabile della portata di sangue che viene fatto fluire per permettere a muscoli ed ossa di operare in condizione più o meno gravose. Il complesso arterioso è dotato di sensori di pressione localizzati nella aorta e controlla la dilatazione del vaso sanguigno al fine di permetterne l'espansione e facilitare un maggiore afflusso di sangue, qualora la pressione arteriose cresca. Viceversa, se si verifica una decrescita della pressione, le pareti si restringono vista la minore necessità del sangue nelle zone periferiche del corpo. Questi sensori lavorano in gruppo con degli organi ricettori che controllano direttamente il flusso di informazioni relative al controllo del battito cardiaco della frequenza del respiro.

La gravità, naturale o artificiale, ha un effetto non trascurabile sulla redistribuzione dei fluidi nel nostro corpo. A causa delle forze apparenti generate, la centrifuga cambia la pressione dei vasi sanguigni e, quindi, causa delle modifiche in volume nel sangue che risultano proporzionali a come i vari compartimenti in cui si è assunto che il nostro organismo sia diviso, sono effettivamente posizionati rispetto al centro di rotazione della centrifuga. Questa relazione può venire riassunta da:

$$P_h(t) = \frac{1}{2} \rho \omega(t)^2 * (R_0^2 - R_i^2)$$

Dove $\omega(t)$ è la velocità angolare della centrifuga misurata in [rad/s], ρ è la densità del sangue misurata in mmHg*s²/cm², R_i è il raggio interno della centrifuga che è misurato come la distanza tra il centro di rotazione e la posizione approssimata del baricentro del corpo dell'astronauta e, infine, il raggio R_0 , o raggio esterno, è identificato come la somma algebrica tra il raggio interno e la lunghezza del comparto in considerazione [8].

Anche la pressione intratoracica cambia durante lo stress ortostatico a causa del peso del corpo superiore che viene esercitato sui compartimenti inferiori. Lo stress ortostatico provoca un aumento del flusso del fluido transcapillare che porta con sé un crollo del volume intravascolare. Il flusso transcapillare verrà poi sottratto al ritorno venoso nei compartimenti dove questo fenomeno è significativo.

Se non si rimane statici, i muscoli e le ossa che vengono azionati, necessitano di un afflusso di sangue maggiore che si quantifica in un aumento della portata in volume da 3-4 ml/min per 100 g di muscolo scheletrico a circa 50-80 ml/min per 100 g.

Questo è la causa di una crescita del valore medio per unità di tempo di pressione arteriosa, battito cardiaco e della pressione intra-addominale.

Per poter studiare gli effetti delle diverse velocità angolari a parità di dimensioni della centrifuga in un ambiente con microgravità e senza effetti indotti dalle accelerazioni di Coriolis del pianeta Terra, si è progettato il Permanent Multipurpose Module (P.M.M.). Esso è stato realizzato in modo da poter essere utilizzato senza problemi di spazio a bordo della I.S.S., possiede un raggio di 1,4 m. Questa dimensione costituisce il minimo ingombro radiale possibile per la suddetta macchina che dovrebbe essere, inoltre, equipaggiata con un macchinario a pedali.

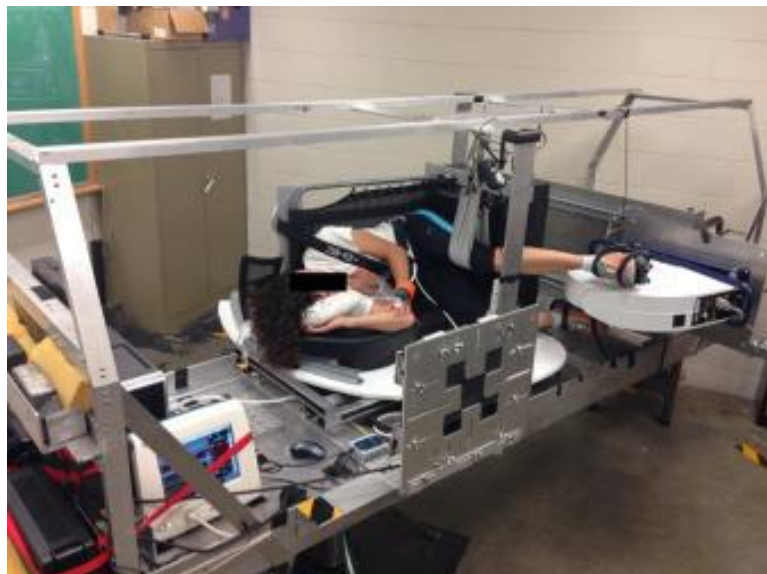


Fig 6: Soggetto posto all'interno di un modello di centrifuga, equipaggiata con dei pedali. Fotografia scattata durante una sessione di esperimenti al M.I.T.¹⁶

Immagine tratta da [8].

Lo scopo è quello di studiare come l'apparato cardiovascolare, locomotore e respiratorio reagiscono alla centrifugazione mentre si compie un esercizio fisico e per realizzare ciò la posizione dell'astronauta è stata studiata in modo da risultare ergonomica così da sfruttare tutto lo spazio disponibile a bordo della Stazione Spaziale. Per semplificare i calcoli si può considerare la posizione in centrifuga del soggetto in modo che la testa e il centro di rotazione siano ad una distanza trascurabile, così facendo la lunghezza del corpo della cavia si può assimilare al raggio della centrifuga commettendo un errore minimo.

Ciò ha, inoltre, permesso di sapere a priori le posizioni relative di ogni singolo comparto cardiovascolare rispetto ad un altro e rispetto al centro di rotazione rendendo più facile il calcolo delle

¹⁶ M.I.T.: Massachusetts Institute of Technology

pressioni idrostatiche delle varie zone. Assumendo come riferimento i piedi del soggetto, si sono scelti tre livelli di accelerazione di gravità artificiale:

- 1g a cui si associa una velocità di rotazione di $n = 28,6$ RPM ($\omega \approx 2,995$ rad/s)
- 1,2g ottenuta da $n = 31,4$ RPM ($\omega \approx 3,288$ rad/s)
- 1,4g da $n = 33,9$ RPM ($\omega \approx 3,55$ rad/s)

Ogni esperimento ha avuto una durata media di 15,5 minuti di cui 3 minuti di stasi, 120 secondi di accelerazione angolare α per portarlo a regime e 60 secondi per fermare la centrifuga. L'esercizio fisico che in media le cavie in 5 minuti si trovano ad attuare deve generare una potenza P di circa 30 W, che corrisponde ad una pedalata di velocità $n = 60$ RPM.

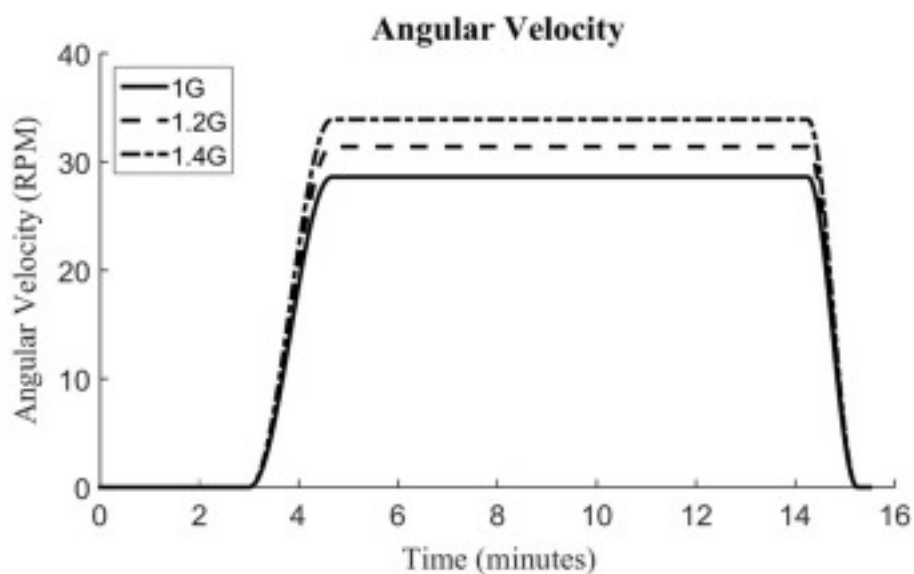


Fig. 7: Grafico dell'andamento della velocità angolare ω durante l'esperimento della durata totale di 15 minuti. Le diverse linee mostrano gli andamenti delle tre diverse velocità a regime.

Immagine tratta da [8].

Durante il transitorio dato dalla fase di accelerazione angolare per arrivare a regime di velocità stazionaria, la risposta data dal sistema cardiovascolare ha portato ad un aumento della pressione idrostatica che, tra i molti effetti, ha avuto come principale conseguenza un aumento della portata di

sangue verso gli arti inferiori. Essendo le dimensioni radiali della centrifuga estremamente ridotte, tanto da avere un diametro dell'ordine di 3 m circa, c'è una fortissima differenza di accelerazione diretta lungo la colonna vertebrale tra comparto "testa" e comparto "piedi". Ciò avrebbe dovuto produrre una maggiore influenza della differenza tra i vari compartimenti causata dal crescente gradiente tra la pressione idrostatica interna ai vasi sanguigni e quella esterna negli arti inferiori.

Tuttavia, anche la pressione esterna si è dimostrata in aumento principalmente a causa delle microcontrazioni dei muscoli dovute allo sforzo delle pedalate. Questo ha agevolato il flusso di sangue lungo il ritorno verso il cuore controbilanciando alcune anomalie indotte dalla centrifugazione.

Infatti, al principio della fase di accelerazione angolare, la resistenza vascolare media della cavia era di circa 0,88 PRU¹⁷, essa è poi notevolmente scesa dovuta all'eccessivo afflusso di sangue nelle gambe. Successivamente, però, gli organi ricettori della pressione hanno attivato una stimolazione che ha permesso al sistema nervoso simpatico di far risalire la resistenza vascolare fino al valore di 0,91 PRU.

Anche il battito del cuore ha risposto con una crescita della frequenza di battito, passando da 75 BPM a quasi 80 BPM. Questi meccanismi gestiti dai baroricettori hanno permesso di mantenere la pressione al valore pressoché costante di 88 mmHg, anche se c'è stato una decrescita di pressione sanguigna nella fase di sistole e, viceversa, c'è stata un aumento di pressione durante la fase speculare, ossia di diastole.

Le differenze durante l'accelerazione tra i tre diversi livelli di gravità sono state minime, anche se ancora registrabili.

Siccome a parità di tempo, bisognava raggiungere tre velocità differenti per altrettante sperimentazioni, più era alta la ω da raggiungere, più era brusca e maggiore in modulo la α , portando così ad avere sintomi di intensità crescente proporzionalmente con la velocità angolare ω di regime per ciascuna sperimentazione.

In conclusione, si può aggiungere che, durante il regime stazionario, le risposte che si sono registrate per i tre diversi livelli di gravità sono state sostanzialmente simili, a parte un maggiore afflusso di sangue verso le estremità inferiori per la rotazione più elevata. Questi risultati costituiscono la prova finale che il nostro corpo è in grado di adattarsi e di regolarsi su diversi livelli di accelerazioni di gravità, indotte anche artificialmente.

¹⁷ PRU: Peripheral Resistance Unit

Il cervello, tramite il sistema nervoso simpatico, ha regolato la secrezione gli ormoni utili a fare fronte ad una situazione esterna diversa da una condizione di riposo. Ha permesso ai muscoli, alle ossa e, persino, alla parte del cervello che costituisce la nostra parte conscia di adeguarci alle mutate condizioni esterne. Ha cambiato la dilatazione dei nostri vasi sanguigni periferici, modificando la portata che scorreva in essi; si deve aggiungere che l'attività fisica ha generato cambiato ancora più radicali, ma per questo meno positivi.

Praticando esercizio si è visto che le risposte dei vari parametri sono migliorate per tutto il sistema cardiovascolare e respiratorio. Si suppone che questo aspetto sia da imputare principalmente alla necessità di avere quantità più ingenti di sangue nelle parti dell'apparato locomotore che hanno attivamente partecipato al moto; considerando il caso della centrifuga con pedali, si tratta principalmente dei muscoli delle gambe, in cui la resistenza dei vasi sanguigni ha avuto un brusco crollo per soddisfare una maggiore richiesta di energia.

Quando si è cessato di fare esercizio fisico, le variabili coinvolte sono tornate al loro stato pre-sperimentazione e, durante la fase di frenata, si ha avuto la conferma di un comportamento opposto rispetto all'accelerazione.

PECULIARITA' DELL'USO DELLA CENTRIFUGA

Dopo il richiamo riguardo i moti nei sistemi relativi, passiamo ora a definire gli aspetti più caratteristici che l'uso delle centrifughe presenta. Avendo citato prima le forze di Coriolis, è importante specificare che il loro effetto non è in alcun modo trascurabile e, siccome non è nemmeno intuibile facilmente, esso può generare delle problematiche.

La comparsa delle forze centrifughe e il loro effetto è comprensibile anche a chi non possiede piena padronanza delle formulazioni che regolano questo fenomeno, ma le forze di Coriolis possono alterare i suoi effetti, modificando la risultante delle forze sia in modulo che in direzione.

Si ipotizzi che un corpo di massa "m" si muova con velocità \mathbf{v}' , componente relativa della velocità assoluta \mathbf{v} , all'interno di una centrifuga a velocità angolare $|\boldsymbol{\omega}| = \text{costante}$ e che essa non sia all'interno di un campo di forza (gravitazionale o elettromagnetica) di intensità non trascurabile.

Com'è intuibile, sul corpo agirà una forza centrifuga proporzionale alla velocità angolare $\boldsymbol{\omega}$ che tenderà ad allontanarlo dal centro di rotazione. Contemporaneamente, però, le forze di Coriolis $\mathbf{F}_{co} = -2m(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}')$ produrranno un effetto che sarà ortogonale al piano identificato dai due vettori $\boldsymbol{\omega}$ e \mathbf{v}' , pertanto, si avranno tre possibili scenari particolari:

- Modifiche nel modulo della risultante. Se \mathbf{v}' è concorde alla velocità tangenziale che si registra sulla superficie della centrifuga, allora la \mathbf{F}_{co} andrà a sommarsi alla forza centrifuga e il corpo sentirà un aumento di peso. Viceversa, il suo peso sembrerà diminuire qualora si muovesse con velocità \mathbf{v}' discorde a $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'$
- Modifiche nella direzione e nel modulo della risultante. Se il corpo con velocità \mathbf{v}' si muove radialmente verso il centro, \mathbf{F}_{co} produrrà un effetto concorde a $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'$. In caso contrario, con \mathbf{v}' diretta verso $+\infty$, \mathbf{F}_{co} sarà discorde al prodotto vettoriale $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'$.
- L'unico caso possibile in cui non si generano forze di Coriolis è quando i vettori $\boldsymbol{\omega}$ e \mathbf{v}' agiscono lungo due direzioni che sono rette parallele tra di loro. Non ci sarà piano identificato dai due vettori e, di conseguenza, il prodotto vettoriale darà risultato nullo

Il caso più generico è quello in cui è presente un vettore \mathbf{v}' con direzione casuale o non costante [3]. In questa eventualità l'unico contributo dato alle forze di Coriolis, sarà quello associato alle

componenti del vettore \mathbf{v}' che, istantaneamente, saranno perpendicolari a $\boldsymbol{\omega}$; questo porterà alla generazione di effetti difficilmente descrivibili e non stazionari che potrebbero anche causare disagi all'equipaggio stesso. I movimenti irregolari possono andare a causare, in persone particolarmente sensibili, sintomi come nausea, cinetosi o problemi di equilibrio, riconducibili ad altri simili percepiti a causa del mal di mare.

L'apparato vestibolare e il labirinto dell'orecchio interno controllano il nostro equilibrio e hanno la funzione di rilevare le eventuali accelerazioni che agiscono sul nostro corpo, in particolare, appunto, la gravità e le variazioni di orientamento causate dal movimento della testa e dai momenti di rollio, beccheggio ed imbardata.

È, inoltre, il principale responsabile dei malesseri sopraccitati in quanto spinge il sistema nervoso a stimolare il midollo allungato, in particolare la parte di esso che è responsabile del vomito, a darci la sintomatologia descritta.

Si noti come non compaia nella formula della forza di Coriolis il raggio R della centrifuga. Ciò significa che sarà presente in uguale misura a parità di $\boldsymbol{\omega}$ e \mathbf{v}' per raggi diversi.

Diversi studi sull'utilizzo delle centrifughe e su come gli esseri umani reagiscano ad esse, hanno mostrato che il limite inferiore che bisogna essere in grado di garantire per avere un buon compromesso tra un'accelerazione sufficiente a generare una gravità artificiale compresa in un intervallo $(0,3-1)g$ e disturbi minimi per l'equipaggio, è una velocità angolare di $n = 6$ rpm, equivalente a $\omega = n \cdot 2\pi / 60 \approx 0.628$ rad/s per una centrifuga di raggio $R = 12-24$ m.

Si è arrivati a questi risultati tramite studi che analizzavano l'abilità di rimanere in piedi, di muoversi facilmente, di compiere sforzi e spostare oggetti. I margini di tolleranza per un equipaggio umano sono estremamente variabili da individuo a individuo, in base alla personale resistenza e ai limiti di ogni umano [3].

È provato, infatti, che si potrebbe superare il valore suddetto di velocità angolare fino ad arrivare a circa $n = 24$ rpm ($\omega \approx 2,5133$ rad/s), previa fase di ambientamento al nuovo regime, che sarebbe logicamente caratterizzata di nuovo da nausea, disorientamento spaziale e cinetosi.

Una sessione di sperimentazioni di queste tecnologie di centrifuga sulla Stazione Spaziale ha comunque dimostrato che, dopo una settimana, dall'inizio dell'utilizzo della centrifuga, un astronauta assicurato su una sedia libera di ruotare non risente più di questi effetti negativi derivati dalla forza di Coriolis, se effettua movimenti con la testa. La stessa $\mathbf{F}_{c\omega}$ si dimostra direttamente proporzionale all'intensità della gravità artificiale, a parità della velocità angolare ω ; di conseguenza, un altro

metodo per limitare le controindicazioni è limitare i movimenti di testa, almeno nella prima fase di ambientamento.

Finora si è visto, grazie agli esperimenti condotti, che i limiti umani di adattamento ad una data ω e ad un dato R sono dell'ordine di 1 minuto, ma bisogna ancora investigare i limiti estremi dell'adattamento sotto condizioni che risultino più gravose per l'equipaggio.

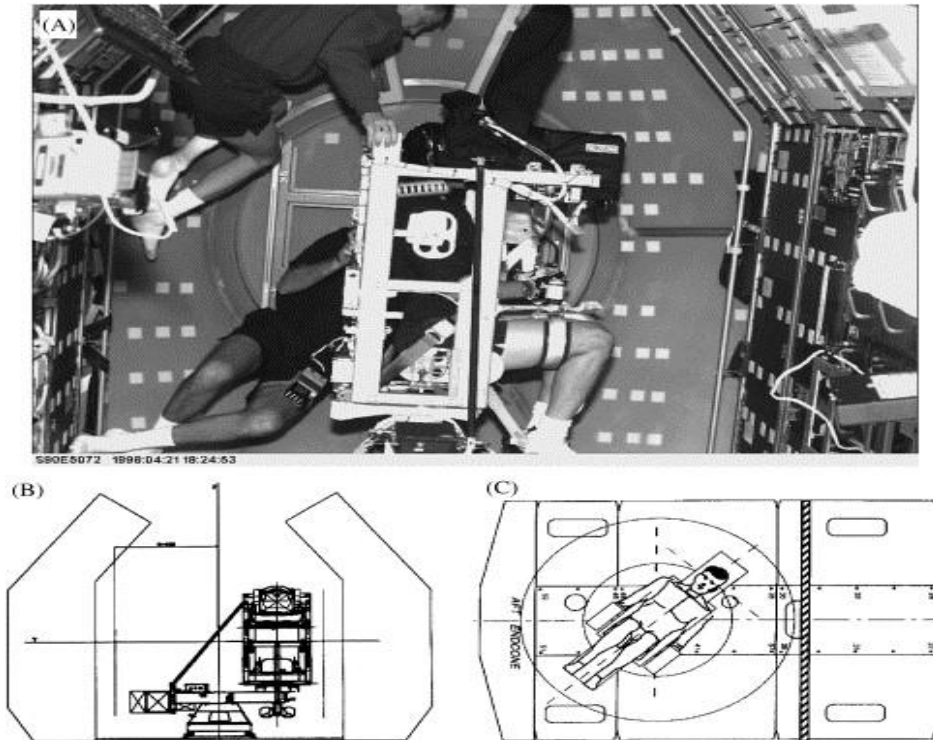


Fig. 8: (A) La centrifuga mostrata in figura è stata progettata da E.S.A. per essere adoperata sulla Stazione Spaziale Internazionale. Vengono mostrate qui le fasi di preparazione per un esperimento in assetto Left-Ear-Out (L.E.O.).

(B) Vista laterale riportata dalla documentazione progettuale E.S.A. della centrifuga.

(C) vista dall'alto del macchinario per evidenziare la posizione supina del soggetto. Immagine tratta da [6].

Fino ad oggi le principali contromisure volte a combattere ciò che è stato finora riportato sono stati esercizi aerobici e attività fisica per evitare il deterioramento dell'apparato locomotore¹⁸, vari sistemi per impedire lo spostamento dei fluidi del corpo dagli arti inferiori...

¹⁸ **APPARATO LOCOMOTORE:** definito come il complesso dell'apparato scheletrico e muscolare, responsabile del corretto movimento del corpo.

Sulla I.S.S. hanno già trovato applicazioni pratiche molte di queste soluzioni e il loro utilizzo ha permesso di migliorare notevolmente le condizioni dell'equipaggio riducendo i rischi del decondizionamento. Ciononostante, essi sembrano non bastare, la loro efficacia nel mantenere i livelli fisici pre-volo rimane ancora tutta da dimostrare e la loro applicazione nello spazio è quanto meno costosa e difficoltosa.

Allo scopo di affiancare i suddetti metodi, molti ricercatori hanno cominciato a cercare un "sostituto" alla mancante forza di gravità. Finora il candidato più plausibile per adempiere al compito di supplire a tale forza è stato identificato in apparecchiature basate sul principio delle forze apparenti, agenti nei "Sistemi di Riferimento non inerziali".

In particolare, nella maggior parte dei casi, si è suggerito di usare le forze centrifughe, nonostante siano state proposte anche altre soluzioni che tuttora riscontrano minore attenzione per via della loro complessità.

Gli esperimenti sulle centrifughe sono ora volti a scoprire come si possano effettivamente applicare, studiando i vari parametri di progetto che andrebbero ad influenzare l'efficacia e l'efficienza di tale soluzione. Alcuni di essi sono:

- Raggio della centrifuga, "R"
- Velocità ed accelerazione angolare, " ω " e " α "

Come disporre i motori che dovrebbero provvedere alla rotazione:

se si prevedono dimensioni significative, allora si deve progettare un sistema di più strutture concentriche a simmetria sferica e/o cilindrica. Però per realizzare la stessa accelerazione normale, $a_n = m \cdot \omega^2 / R$, per raggi diversi, necessitano di velocità angolari " ω " diverse. Da qui nascerebbero una serie di problemi pratici: ad esempio, come mettere in comunicazione parti diverse di una stessa nave o stazione quando le stesse ruotano a velocità diverse.

Bisogna inoltre capire, qualora si volesse effettivamente realizzare un veicolo spaziale dotato di tale macchina, se e come si possa produrre una nave che sia essa stessa una centrifuga (a grande raggio, in questo caso). D'altro canto, si potrebbe dotarla di diversi dispositivi rotanti a corto-medio raggio.

Se si verificasse la seconda ipotesi, bisognerebbe, nuovamente, capire se si vuole progettare e installare tali macchine perché funzionino ininterrottamente oppure ad intermittenza. Questo

permetterebbe all'equipaggio di usufruire dei benefici di tale macchina solo in precisi momenti, proteggendolo così dalle eventuali mancanze che tali dispositivi potrebbero mostrare.

Si deve comunque considerare che sottoporsi solamente periodicamente alla centrifuga potrebbe altresì rivelarsi più dannoso che usufruirne costantemente, questi aspetti non hanno ancora dati empirici che possano permetterci di capire quale tra queste vie sia il compromesso migliore tra fattibilità, anche da un punto di vista economico e progettuale, dannosità e funzionalità. Bisogna, tuttavia, ricordare che, dal punto di vista della sperimentazione scientifica, la microgravità presenta comunque dei pregi e maggiori facilitazioni rispetto a quella analoga svolta sulla Terra, come evidenziato dai dati raccolti dai ricercatori sulla I.S.S.

Finora le sperimentazioni si sono svolte principalmente sulla Terra usando centrifughe a corto raggio. Questo vuol dire che sulla cavia agiva, nella fase di stazionarietà, quindi con $\omega = \text{costante}$, una risultante della forza di gravità e della forza centrifuga. Mentre nello spazio agirebbe solo la seconda [3].

I possibili effetti sono comunque prevedibili grazie a modelli e simulazioni matematiche a basso costo computazionale. Essi, cionondimeno, permettono di esplorare un grande numero di configurazioni possibili con un'elevata flessibilità.

In prima approssimazione, questi sistemi hanno aiutato a comprendere le modifiche nel sistema cardiovascolare e come variano mandata (sangue arterioso) e ritorno (sangue venoso) in termini di portata e pressioni. I risultati di queste ricerche possono anche essere estesi ad altri fluidi corporei in altri apparati, in particolare a quello renale ed endocrino.

Il principale problema di questo settore è che esso è un campo di studi ancora relativamente recente, moltissime sono le variabili e gli aspetti da considerare e tra esse non rientra soltanto l'aspetto pratico, quale progettuale, ingegneristico o scientifico che concorre materialmente alla produzione di nuove tecnologie, ma anche quello economico. E, non ultimo, bisogna considerare che la scienza non è immune dalle ingerenze politiche, burocratiche, etiche e morali dei tempi in cui viene sviluppata e che tale coinvolgimento è direttamente proporzionale al numero di risorse investite e alla complessità del campo di studi in questione e alla difficoltà di realizzazione.

Questi aspetti, sia nel bene che nel male, limitano e rallentano di molto lo sviluppo che si sarebbe avuto se tali aspetti non fossero mai esistiti.

Ora si presenta a noi per la prima volta la possibilità di una Space Economy che senza dubbio mira a coinvolgere un numero sempre crescente di persone rendendo lo spazio un settore sempre meno "di

nicchia”, riservato a ingegneri, fisici e piloti delle poche grandi potenze mondiali. Più persone significa più possibilità di investigare gli aspetti che ancora ci sono sconosciuti generando così un settore con potenzialità di crescita per ora solo accennate. Il rovescio della medaglia è che più persone coinvolte significa anche più variabili imprevedibili da gestire, dovute principalmente all’emotività degli umani che anche il migliore addestramento non riuscirà ad annullare del tutto.

Questo vuol dire che sarebbe conveniente un’applicazione anche a questo settore delle discipline che si occupano dei fattori umani, già largamente usate nel campo dell’aeronautica civile e militare.

Nel 1998, durante una missione spaziale della durata di 16 giorni, fu effettuato quello che è, finora, il primo e unico esperimento a bordo di uno Space Shuttle con una centrifuga per valutarne gli effetti su un equipaggio umano.

Per quanto riguarda l’intolleranza ortostatica e per il decondizionamento dell’apparato cardiocircolatorio degli occupanti, i risultati sono incoraggianti: i membri dell’equipaggio sono stati sottoposti alla gravità artificiale di intensità compresa nell’intervallo di (0,5-1)g, generata da una centrifuga, per “solamente” 20 minuti al giorno, secondo sia un asse-body trasversale che uno longitudinale, e questo tempo sembra essere sufficiente per cominciare a vedere i primi segni di miglioramento. Si può ragionevolmente ritenere che non sia strettamente necessario essere continuamente sottoposti alla gravità artificiale per avere dei benefici, anche se bisogna ancora cercare di capire se questi effetti siano sufficienti.

Qualora la teoria si dimostrasse corretta, nella prima fase della loro implementazione si potrebbe semplificare notevolmente l’utilizzo di queste apparecchiature, almeno fino a quando non si sarà maturata una maggiore dimestichezza e conoscenza delle conseguenze del loro uso.

Una centrifuga a corto raggio è strutturata in modo che il soggetto si ritrovi in posizione supina con i piedi appoggiati sulla superficie della centrifuga e la testa vicina all’asse di rotazione. In questo modo la forza centrifuga è diretta lungo l’asse longitudinale del corpo verso gli arti inferiori, come si avrebbe sulla Terra.

Se questa tecnologia dimostrasse di essere efficace, venendo usata anche solo con un funzionamento intermittente, presenterebbe il vantaggio di essere meno costosa di un’intera navicella spaziale posta in rotazione perpetua da dei motori specifici e, inoltre, permetterebbe di ridurre il tempo e l’intensità degli esercizi fisici a cui gli astronauti sono ripetutamente sottoposti per combattere la perdita di massa ossea e muscolare.

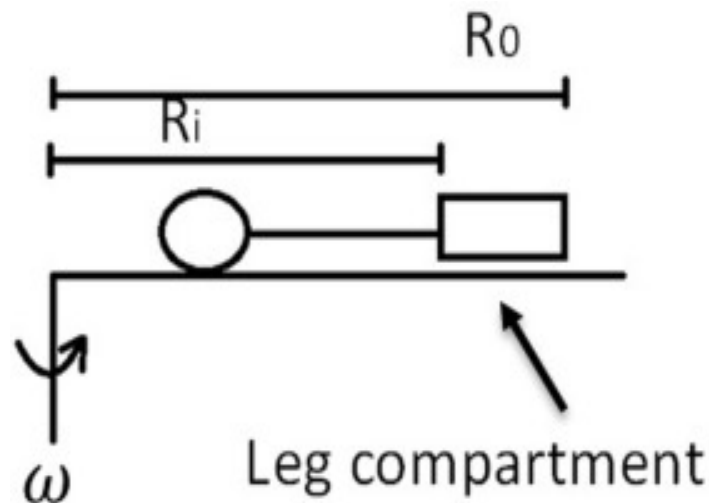


Fig. 9: Rappresentazione di una cavia all'interno della centrifuga di velocità angolare ω . Il raggio interno R_i è la distanza tra il limite superiore del comparto in considerazione e l'asse di rotazione e il raggio esterno R_o è il raggio massimo da considerare, pari alla somma dell'altezza del soggetto e la distanza tra la testa e il centro di rotazione.

Immagine presa da [8].

Come si già detto ci sono state pochissime occasioni per poter testare il funzionamento della centrifuga a corto raggio nello spazio.

La maggior parte degli esperimenti di tale tecnologia sono stati fatti sulla Terra, con risultato che nel baricentro G di un generico corpo di massa m , posto all'interno di una centrifuga a corto raggio di raggio R , risulta applicata una forza che è, ovviamente, risultante della forza-peso e della forza centrifuga, $\mathbf{R} = m\mathbf{g} + m\omega^2 R\mathbf{u}_N$.

Essa, ovviamente, ha modulo maggiore di quello che avrebbe la sola forza centrifuga in ambiente di microgravità, $F_{\text{CENTRIFUGA}} = m\omega^2 R < |\mathbf{R}| = [(mg)^2 + (m\omega^2 R)^2]^{1/2}$, ed è inclinata rispetto alla direzione che è identificata dal versore del raggio $\mathbf{u}_R = \mathbf{u}_N$ della centrifuga di un angolo $\varphi = \arctan(mg/m\omega^2 R)$.

Si deve aggiungere che, viste le ridotte dimensioni radiali della centrifuga, praticamente pari all'ordine di grandezza dell'altezza di un umano, si sviluppano dei gradienti radiali non trascurabili lungo la colonna vertebrale che costituisce l'asse longitudinale del nostro corpo. Il risultato è che la forza centrifuga genera accelerazioni molto diverse tra testa ed arti inferiori, dato che cresce linearmente con il raggio; questo può causare disfunzioni nell'apparato cardiocircolatorio, provocando un eccessivo afflusso di sangue dalla testa agli arti inferiori.

Per un corpo di statura media, data una certa ω si potrebbe addirittura avere un'accelerazione di 0,2g in corrispondenza del cervello, 1g nel baricentro del corpo, fino a 2g nei piedi.

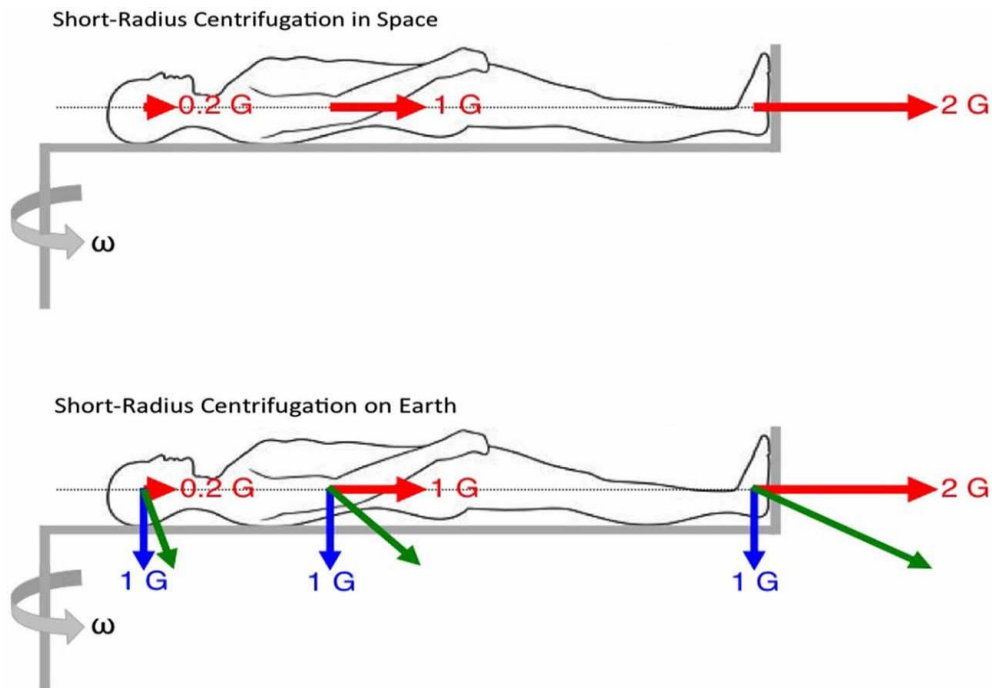


Fig. 10: l'immagine mostra le differenze dell'utilizzo della medesima centrifuga sulla Terra e in microgravità. In verde, viene riportata la risultante della forza centrifuga e della forza di gravità.

Immagine tratta da [3].

L'uso più logico di questa tecnologia, al fine di ridurre il decondizionamento cardiovascolare e la perdita di massa ossea e muscolare sarebbe, ovviamente, un veicolo spaziale completamente rotante per generare 1g di gravità artificiale. Per usare una centrifuga a funzionamento intermittente a corto raggio, bisogna, innanzitutto, capire l'intervallo di tempo in cui essa va usata e per quanto tempo è necessario garantire un tale funzionamento per avere benefici sufficienti a giustificare la continua messa in moto e bloccaggio della macchina.

Questo funzionamento intermittente potrebbe comportare un numero maggiore di consumi; tuttavia, per una macchina a corto raggio, esso dovrebbe venire bilanciato dalla più bassa quantità di energia richiesta per imprimere il moto rotatorio alla macchina di massa M , visto il suo, evidentemente, minore momento di inerzia $I = Mp^2$ dove "p" è il raggio di inerzia proprio di ciascuna centrifuga che, molto probabilmente, dovrà essere un parametro di progetto.

Argomento di non secondaria importanza: in vista di una corsa allo spazio sempre più internazionale e meno monopolistica, l'utilizzo e la costruzione di queste centrifughe dovrà essere normato anche a livello legislativo al fine di uniformare i componenti di tali dispositivi, similmente a quanto accade ora con le tecnologie adoperate sugli aerei. Questo sembra condurre al logico risultato che verranno a ridursi i gradi di libertà progettuali di cui un ingegnere o un'azienda può disporre ora in fase di studio o avamprogetto.

Di conseguenza, a parità di dimensioni o missione di una centrifuga, parametri come il raggio di inerzia ρ si troveranno ad essere quantomeno simili anche se provenienti da aziende diverse o da nazioni diverse.

Tornando al precedente paragrafo, la centrifuga intermittente a corto raggio sembra essere finora la soluzione più pratica ed economica da applicare nell'esplorazione spaziale del prossimo futuro. Questa ipotesi è incoraggiata soprattutto dal fatto che si sta riuscendo a dimostrare come la soluzione sia una delle prime contromisure efficaci nell'attenuare la maggior parte dei problemi, che sono già stati descritti in precedenza, causati dal volo spaziale. Su questo argomento si sono focalizzati 19 studi, che, vedendo gli effetti di questo tipo di centrifuga, hanno deciso di assumere come convenzione l'assetto in cui essa viene adoperata per sviluppare 1g in prossimità del cuore.

L'utente viene assunto in posizione supina. Per annullare gli effetti della gravità terrestre, qualora non fosse possibile operare direttamente nello spazio, si può ricorrere all'utilizzo di una seduta di "dry-immersion"¹⁹.

Quindi la cavia viene analizzata in un periodo di inattività, non sono stati predisposti gli esercizi fisici solitamente usati per combattere il decondizionamento. Ciò che è risultato è che le centrifughe a corto raggio ad uso intermittente hanno saputo:

- Contenere la decrescita di plasma nel sangue
- Migliorare i limiti di tolleranza ortostatica nel periodo successivo all'inattività
- Ridurre le risposte negative ai test diagnostici alla fine dell'inattività. Anche l'aumento di battito cardiaco è stato contenuto

¹⁹ **DRY-IMMERSION:** sistema per simulare le condizioni di microgravità e per verificare gli effetti che tale condizione genera sul corpo umano durante un volo spaziale di breve durata. Usato per replicare la mancanza di reazioni vincolari sul nostro corpo o di carichi assiali/trasversali, così come l'inattività fisica che è causa del decondizionamento. La durata di tali test è estremamente variabile: può andare dalle poche ore a diversi giorni. Questo permette di studiare con precisione crescente le reazioni dei vari apparati

- L'attività nervosa dei muscoli è aumentata

Usando queste macchine in orbita, si è visto che il valore-soglia di accelerazione in cui un umano medio comincia a presentare la sensazione di verticalità è intorno al 0,22g e 0,5g. Nel caso del volo parabolico, questo valore-soglia scende fino ad un intervallo di 0,16g e 0,38g.

Questa estrema varietà di valori è giustificata dal fatto che ciascun umano ha una percezione altamente soggettiva della verticalità; grazie a delle ricerche in proposito si è potuto verificare in che modo il nostro cervello può essere “ingannato” per fargli credere di essere in piedi con un livello di gravità terrestre.

Il risultato è che circa il 50% delle cavie aveva la sensazione di essere in posizione eretta quando percepiva un'accelerazione di 1g nel suo centro di massa (questo perché evidentemente il loro cervello si basa su sensori extra-vestibolari per percepire lo spazio verticale), mentre l'altra metà delle cavie sentiva la verticalità terrestre quando veniva applicato 1g all'altezza dell'orecchio (quindi il loro cervello si basava principalmente sull'apparato neuro-vestibolare, in particolare sugli otoliti).

Nel momento in cui si comincerà ad organizzare missioni con equipaggio umano verso altri corpi celesti, il corpo umano dovrà già essere abituato a sopravvivere in ambienti con gravità inferiori a quella terrestre. I primi sui quali ci troveremo ad operare saranno senza dubbio la Luna e Marte che sono quelli più immediatamente prossimi alla Terra.

Si escludono, ovviamente, dall'elenco dei possibili candidati ad ospitare le prossime missioni umane il pianeta Venere, il mondo che è più simile e più vicino a noi di qualunque altro, e Mercurio, anche se, come si è scoperto recentemente, durante la sua rivoluzione è quello che possiede la minore distanza media dalla Terra tra tutti gli altri corpi nel Sistema Solare. Attualmente, tali mondi si escludono per i chiari motivi di impraticabilità che sono dovuti alle temperature proibitive che li caratterizzano.

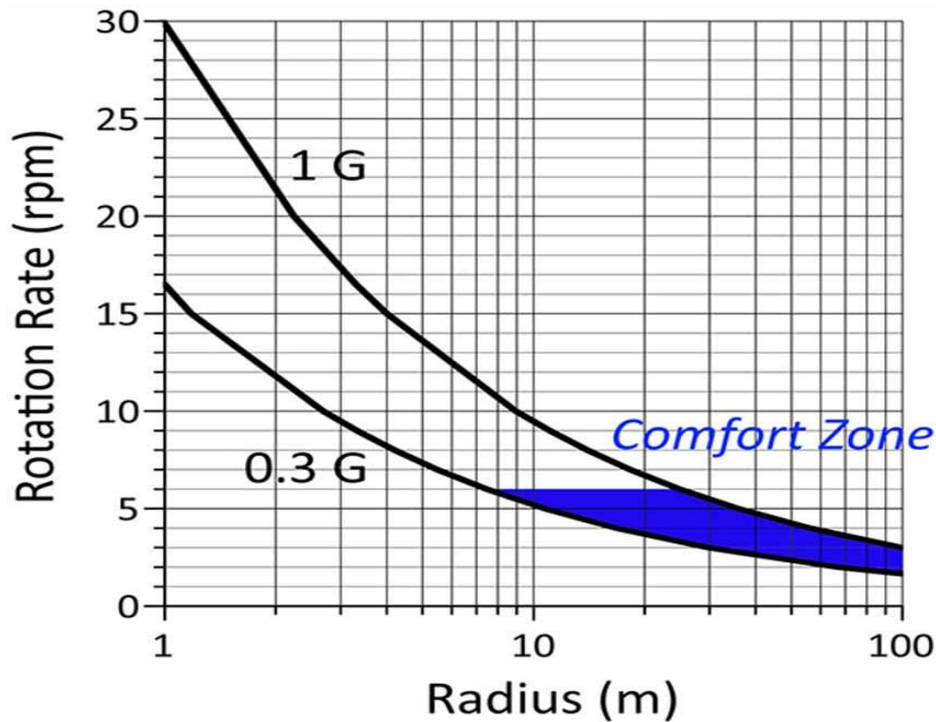


Fig. 11: Il grafico evidenzia in blu la cosiddetta “comfort zone” per l’essere umano medio data da un certo intervallo di valori di velocità angolare e raggio della centrifuga per simulare la gravità. La massima n ammissibile è $n_{MAX} = 6$ rpm. Qui si è tenuto conto anche delle forze di Coriolis nelle situazioni (camminare, compiere sforzi...)

Immagine tratta da [3].

La Luna possiede un’accelerazione di gravità che è circa $1/6g \approx 0,166g$ e Marte arriva $0,38g$, questo significa che bisogna cercare di capire se gravità così sensibilmente minori di quella per cui il nostro corpo è stato programmato, sono sufficienti a combattere in modo efficace il decondizionamento dell’apparato cardiocircolatorio o locomotore indotto dalla microgravità.

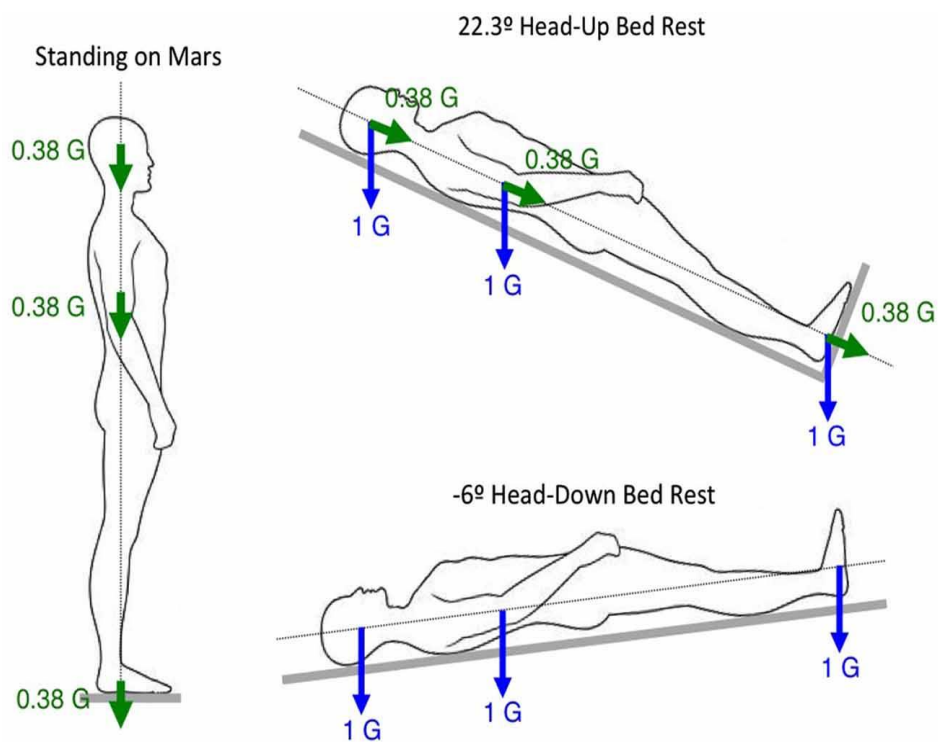
Per realizzare delle efficaci simulazioni di queste nuove grandezze, si ricorre fondamentalmente alla teoria dei piani inclinati per modificare le centrifughe: un corpo di massa m generica è appoggiato su un piano privo di attrito e inclinato di un angolo θ . Se il corpo inizialmente fermo viene lasciato libero di muoversi, necessariamente, avrà un’accelerazione che è pari a $g \cdot \sin\theta < g$.

Supponiamo che l’astronauta sia supino con la testa in alto rivolta verso l’asse di rotazione e i piedi verso $r \rightarrow +\infty$. Inclinando il raggio della centrifuga (che corrisponde all’asse longitudinale del corpo umano identificato dalla colonna vertebrale) di un appropriato θ , che chiameremo θ_L , a parità di velocità angolare ω si può ottenere l’accelerazione della gravità lunare per studiarne gli effetti. Analogamente per Marte con l’angolo θ_M :

- $\theta_L = \arcsen(1/6) \approx 9,6^\circ$ per la Luna

- $\theta_M = \arcsin(0,38) \approx 22.334^\circ$ per Marte

La sperimentazione viene condotta in modo che si applichino con la centrifuga le condizioni di un viaggio verso la Luna con una replicazione della microgravità che si troverebbe nelle fasi di andata e rientro e, infine, con una simulazione della gravità lunare [3].



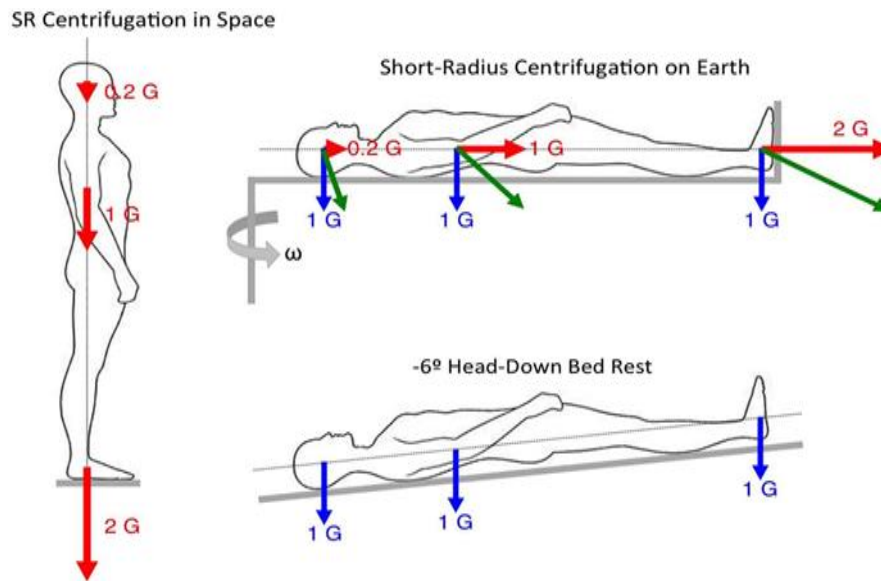


Fig.12: Le immagini riportano le varie condizioni in cui un umano si può trovare dentro una centrifuga. E come queste possibili configurazioni sono esplorabili variando l'inclinazione del raggio della stessa senza modificare la velocità angolare.

Immagini tratte da [3].

Si realizza ciò variando l'inclinazione del piano su cui l'astronauta si trova:

- $\theta = 6^\circ$ con la testa rivolta verso la parte bassa del piano inclinato per 4 giorni (simulazione del viaggio di andata)
- $\theta = \theta_L$ con la testa rivolta verso l'alto per 6 giorni (simulazione della permanenza sulla Luna). Durante questa fase gli astronauti hanno affrontato una serie di esercizi muscolari ed aerobici
- $\theta = 6^\circ$ con la testa nuovamente verso il basso per 4 giorni (simulazione del viaggio di ritorno)

Purtroppo il risultato dato dai test diagnostici alla fine della sperimentazione è che la reazione del fisico umano, che in media si è registrata nelle cavie per questa simulazione di 14 giorni in totale, non ha dato significativi miglioramenti rispetto a una condizione in cui si è rimasti per 14 giorni in un ambiente con microgravità, equivalenti a 14 giorni di inattività passati con la testa inclinata verso il basso. Di conseguenza, la gravità lunare non è sicuramente sufficiente a combattere gli effetti negativi del decondizionamento.

Allo stato attuale non si sa ancora se quella di Marte lo sia.

Cionondimeno, al fine di studiare gli effetti della gravità marziana, il M.I.T. ha condotto degli esperimenti in tal senso producendo un diverso tipo di riduttore di gravità. Stavolta non sono state usate centrifughe ad inclinazione variabile, la macchina “Moonwalker” opera la riduzione del carico longitudinale sul corpo umano tramite un sistema di elastici. Si può anche usare aria compressa per sollevare il soggetto, questo sistema ha come vantaggio che l’aria agisce in tutte le direzioni e non si generano delle locali concentrazioni di forza che si hanno per il primo tipo.

Un ultimo tipo di parzializzatore di gravità è stato studiato dalla NASA: esso sospende il soggetto da terra e lo pone in posizione orizzontale in modo che possa camminare, correre o anche saltare su un muro rotante interno di una centrifuga a diversi livelli di gravità.

La necessità di sapere le conseguenze dei diversi livelli di accelerazione è data principalmente dal fatto che un astronauta nelle varie fasi del volo può trovarsi ad affrontare valori molto diversi rispetto a 1g terrestre. La velocità di fuga dalla Terra equivale a circa $v_{FUGA} = (2G \cdot M_{TERRA} / R_{TERRA})^{1/2} \approx 11'182.374 \text{ m/s}$, ciò significa che nella fase di decollo si deve saper resistere senza eccessivi problemi fino a 4g.

Al rientro si può arrivare ad accelerazioni di 1,2g lungo l’asse-corpo longitudinale per un tempo di 17 minuti. Successivamente, nelle ultime fasi, il pilota ruota lo Shuttle di 80° e qui si può arrivare anche a 1,9g, molti astronauti commettono l’errore di muovere la testa per tentare di riadattarsi alla gravità terrestre e di riattivare il corretto funzionamento del sistema neuro-vestibolare ritrovando una posizione di equilibrio.

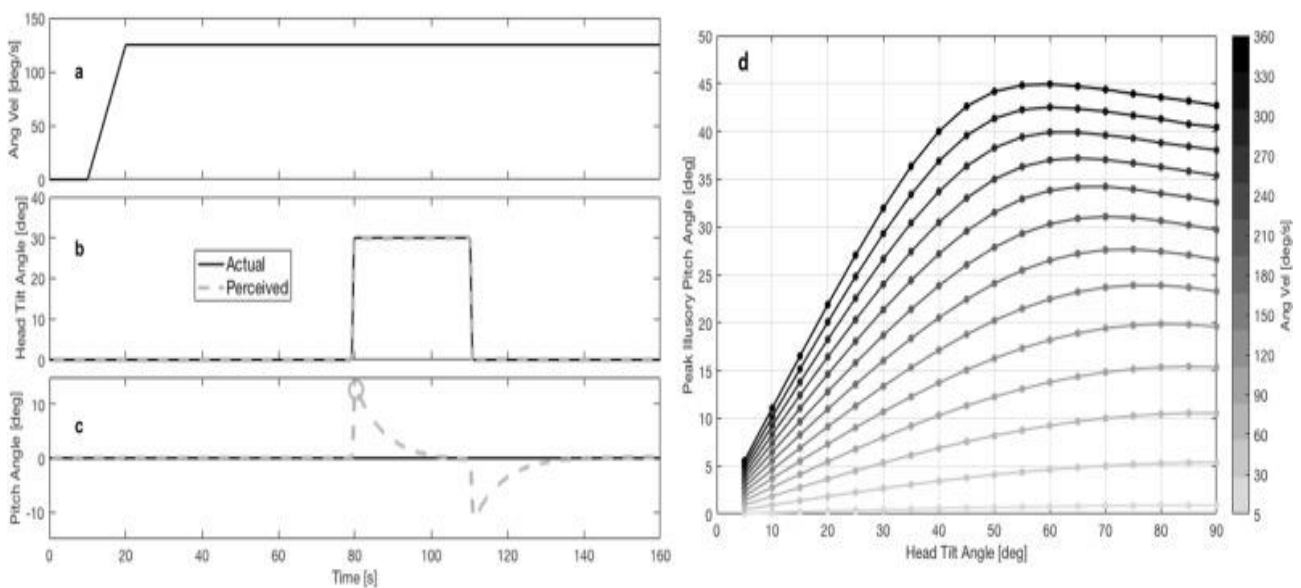


Fig. 13: Andamenti previsti dovuti all’angolo di inclinazione percepita durante le simulazioni di gravità artificiale:

- (a) andamento della velocità angolare
- (b) andamento dell'inclinazione della testa
- (c) andamento dell'angolo che la direzione della testa descrive con il riferimento orizzontale (le forze di Coriolis danno percezioni errate alle cavie sulla effettiva inclinazione della testa, si può prevedere questi effetti tramite la "regola della mano destra")
- (d) risultati empirici di uno studio sugli effetti dell'angolo di inclinazione della testa che si manifestano nei picchi percepiti dell'inclinazione dell'angolo di inclinazione a seguito di variazioni della velocità angolare

Immagine tratta da [9].

CONCLUSIONI

In questo ultimo capitolo della presente ricerca, si cercherà fornire un generale riepilogo delle future ricerche che questa disciplina ancora nuova e pionieristica sembra avere in serbo per gli studiosi che si soffermeranno su il campo qui trattato. Si provvederà a fare un rapido accenno anche alle possibili soluzioni alternative alle centrifughe. È giusto ribadire che tali tecnologie finora non hanno trovato grande spazio, né a livello accademico, né tanto meno a livello sperimentale, per via della loro complessità.

L'unico esempio che verrà qui fornito è costituito da un modello che ha il vantaggio di annullare le criticità legate alle forze di Coriolis, portate alla luce nelle sperimentazioni precedentemente descritte. Il principio di base poggia le fondamenta teoriche sempre sulle forze apparenti dei moti relativi, ma differentemente dalla centrifuga esse non nascono dalla natura rotativa del moto, ma da una puramente lineare (almeno in fase di regime).

L'idea nasce da un famoso esperimento mentale, o "Gedanken-experiment"²⁰ di Albert Einstein:

si assuma un sistema di riferimento inerziale centrato in un punto notevole O e uno non-inerziale centrato in O' libero di traslare, ma non di ruotare, con moto rettilineo. È il caso opposto a quello della centrifuga.

Per semplicità di calcolo, si ipotizzi ora che il moto avvenga lungo degli assi coordinati del primo sistema, lungo tale asse agisce un'accelerazione lineare costante. Questo è il caso di un oggetto in caduta libera da un'altezza h (che assumiamo tanto piccola da considerare costante l'accelerazione di gravità) in un campo gravitazionale. Se l'oggetto in questione fosse solo un contenitore e se ci fosse un secondo oggetto non vincolato all'interno del primo corpo, entrambi cadrebbero con la stessa accelerazione e, nel sistema di riferimento non-inerziale, il contenuto fluttuerebbe all'interno del contenitore come se non ci fosse la gravità. Questo modello viene usato nel volo parabolico. Aereo e passeggeri cadono con la stessa accelerazione, essi quindi non possono né toccare il pavimento né venire schiacciati contro il soffitto dell'abitacolo.

Si ribalti ora il presupposto iniziale: se in un campo di gravità, all'interno di un sistema di riferimento non-inerziale, si può non solo annullare la gravità ma anche modificarla in modulo, con

²⁰ **GEDANKEN-EXPERIMENT:** dal tedesco "Gedanken" = "mente" ed "Experiment" = "esperimento". Parola creata dal fisico Hans Ørsted. Si tratta semplicemente di immaginare un possibile scenario per scopi puramente ipotetici per spiegare un fenomeno qualora non sia possibile un esperimento pratico

la stessa tecnologia si può creare un'accelerazione lineare dove non c'è gravità al fine di simularla. Un'astronave che procede nel vuoto cosmico abbastanza lontano da qualunque campo di forza, che quindi si può considerare trascurabile, con un'accelerazione $a = g = 9,81 \text{ m/s}^2$, premerebbe il suo equipaggio sulla parete posteriore della navicella come se su quella parete agisse una forza di gravità di livello terrestre.

Questa ipotesi ha, però, diversi problemi di fondo:

- Un'accelerazione che agisce per un tempo indefinito nella meccanica classica dovrebbe portare la nave ad avere una velocità $v \rightarrow +\infty$, ma, come sappiamo dalla “Teoria della relatività”, ciò è impossibile perché data un'accelerazione costante che agisce per un tempo $t \rightarrow +\infty$ darà una velocità $v \rightarrow c^-$ dove “c” è la velocità della luce e quindi dopo un tempo sufficientemente lungo la differenza di velocità $\Delta v = [v(t + dt) - v(t)] \rightarrow 0^+$ e gli effetti di tale sistema svaniranno.
- Un'altra difficoltà ancora più preminente, perché più pratica, è destinata a causare il fallimento di questo potenziale progetto ancora prima di arrivare in regimi relativistici: avere un'accelerazione $a = \text{costante}$ per un tempo indefinito significa che ci deve essere un motore capace di generare una spinta $T = \text{costante}$ per un tempo indefinito, senza problemi di esaurimento di carburante, di danneggiamento o di fatica.

Significa anche una struttura capace di reggere al principio di inerzia per tempo indefinito. Ed anche assumendo che tutte le precedenti condizioni siano soddisfatte, è necessario comunque avere un motore capace di generare energia infinita violando il primo principio della Termodinamica.

Chi ha ipotizzato questa soluzione, al fine di ovviare a questi problemi, ha proposto come soluzione di ruotare istantaneamente la nave arrivati al limite ammissibile dai motori e di usare poi questi ultimi per frenarla, così facendo la frenata andrebbe a generare la stessa gravità artificiale sulla stessa parete. Una volta raggiunto il limite inferiore il modulo avrebbe nuovamente ruotato su sé stesso e ricominciato ad accelerare, instaurando così un moto periodico [9].

Come è ovvio, questa soluzione presenta caratteristiche che risultano molto più difficili e dispendiose da implementare rispetto ad una centrifuga, sia a corto che medio-lungo raggio.

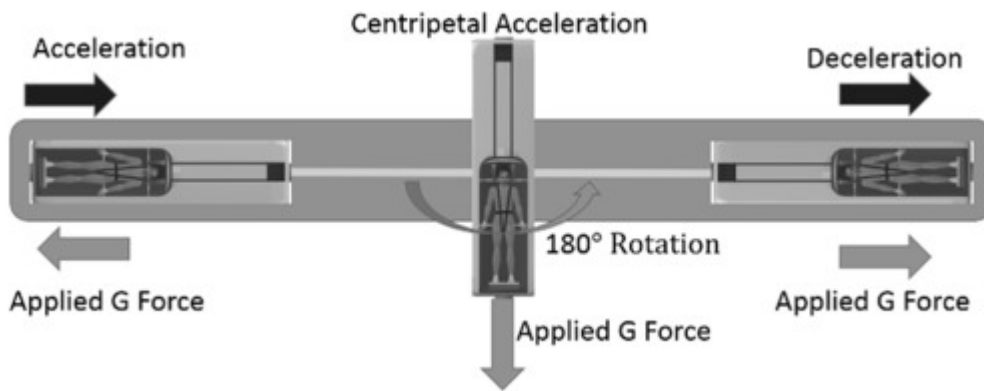


Fig. 14: Progetto di un'ipotetica apparecchiatura ibrida che accelera linearmente l'astronauta con intensità g per poi ruotare pressoché istantaneamente di 180° e cominciare la fase di decelerazione di modulo $-g$.

Immagine tratta da [9].

L'esempio che qui è stato fornito serve principalmente per spiegare come mai le ricerche sulla gravità artificiale al momento non presentano grandi alternative e perché esse si sono focalizzate quasi sempre solo su una direzione con pochissime, ed ancor più rare, variazioni.

Qualunque sia il metodo proposto e la tecnologia adoperata, non bisogna assolutamente dimenticare che questi sono tutti sistemi presentano come medesimo fine quello di simulare la forza di gravità per combattere il decondizionamento dell'apparato cardiocircolatorio e locomotore. Qualunque soluzione deve poter svolgere questa funzione come requisito fondamentale, possibilmente limitando i problemi che si potrebbero verificare negli astronauti che la utilizzeranno. La discriminante tra le varie tecnologie dovrebbe essere semplicemente questa, la loro efficienza deve essere sufficientemente alta da non andare a provocare malesseri ancora peggiori; le nuove discipline, specialmente se ingegneristiche, portano sempre con sé un enorme problema: per quanto si possano implementare simulazioni e realizzare algoritmi, si possono solo avere delle ipotesi che garantiscono il funzionamento della macchina entro certi limiti di probabilità. Finché non ci sarà un uso sistematico e continuativo su una scala più larga possibile, non si potrà sapere davvero quali siano i margini di sicurezza e di errore, fino a che punto la macchina può spingersi e quali siano le variabili che dipendono principalmente dall'essere umano.

Senza queste condizioni non si può in alcun modo sperare di avere una vera visione di insieme riguardo ad un progetto.

Per ora si può solo sostenere che con un minimo margine di errore, la tecnologia della centrifuga sembra essere in grado di ridurre alcuni tra i più deleteri effetti di una permanenza in ambiente di microgravità. Bisogna ancora capire se essa sarà sufficiente e se, a causa di ciò, non emergano in

coloro che l'hanno adoperata dei problemi di salute in un futuro più o meno distante dal termine della missione.

Già dalle sperimentazioni animali fatte sui topi dalla J.A.X.A. si è visto come le apparecchiature centrifughe siano in grado non solo di supplire alla forza di gravità riducendo gli effetti negativi ma anche come la stessa tecnologia possa essere usata per migliorare la resistenza ossea e il tono muscolare. Questo permette di avere un apparato locomotore che risulta essere, nel suo complesso, più resistente e ciò favorisce anche gli astronauti al momento del ritorno. Essi sono più resilienti e con un corpo meno traumatizzato dalle brusche variazioni delle accelerazioni lineari che hanno sperimentato durante il rientro in atmosfera, dopo un periodo di sostanziale inattività.

Si è visto nei primi capitoli che la condizione di microgravità prolungata in cui gli astronauti della I.S.S. si trovano, causa effetti che sono simili al naturale invecchiamento terrestre e di prolungata inattività. Con quest'ultimo fenomeno si intende sia una degenerazione cellulare che una cardiocircolatoria e fisica.

Abbiamo poi visto come la centrifuga unita ad una macchina a pedali è riuscita a garantire un maggiore afflusso di sangue nei muscoli del corpo che venivano adoperati nel moto, ciò si è tradotto nel modello di analogia elettrica che è stato trattato come una variazione di impedenza nel comparto "gambe". Passando da parametri elettrici ad idraulici, questo ha fornito la prova di una maggiore ossigenazione delle cellule dei muscoli che sottoposti ad un'accelerazione lineare "a" maggiore di "g" ha portato una generale ipertrofia muscolare, ritrovando così i dati che erano stati trovati nell'esperimento della J.A.X.A. [5].

Dopo un'adeguata sessione di gravità artificiale, inoltre, si è registrato che coloro che vi sono stati sottoposti hanno dimostrato di poter resistere meglio al decondizionamento da microgravità e di risultare più probabilmente ascrivibili nella categoria di "finishers". Questo allenamento è riuscito anche ad appianare le iniziali differenze di genere; esse erano principalmente dovute alle diversità fisiologiche tra il corpo di una donna e di uomo, i quali mostravano di avere dei lati deboli in diversi apparati e che essi emergono a seguito di diverse sollecitazioni. Una soluzione univoca per entrambi i sessi non sembra esistere e quindi permangono solo sistemi per una soluzione parziale; qualora fosse possibile una soluzione totale, essa deve essere ancora scoperta.

Cionondimeno, le centrifughe sono state capaci di portare i soggetti a valori simili di tolleranza ortostatica per i due sessi.

Infine, è stato descritto come la stessa centrifuga può essere usata per generare diversi livelli di gravità a parità di velocità angolare ω . Mantenere fissa quest'ultima dopo aver definito un opportuno intervallo di raggio, significa rimanere nella “comfort zone” evidenziata nel grafico in **Fig. 11**.

Essere all'interno di quell'area vuol dire avere a disposizione un numero teoricamente infinito di intensità di gravità artificiale, è un'ulteriore conferma della grande versatilità di queste macchine. Chiaramente la configurazione raccomandabile dovrebbe essere quella di un'astronave completamente rotante, ossia una centrifuga a grande raggio, perché così facendo si ridurrebbero gli effetti negativi degli elevati gradienti di accelerazione lungo il corpo della cavia nelle centrifughe a corto raggio. Un vantaggio in più è che le forze di Coriolis, come si è spiegato non dipendono dal raggio R della macchina e quindi essi non costituiscono una limitante alle dimensioni del modulo.

Tuttavia nell'immediato futuro la soluzione che risulta maggiormente percorribile è quella di macchine a corto raggio montate a bordo delle astronavi non rotanti, almeno fino a quando questa tecnologia non sarà maturata a sufficienza da permettere costi minori a parità di dimensioni. Quando avremo raggiunto un'adeguata conoscenza, ed esperienza soprattutto, di queste macchine, si potranno pensare di realizzare modifiche che finora sono mere ipotesi al fine di migliorare ancora tali dispositivi. Purtroppo, non è si può escludere che essi possano causare problemi sul lunghissimo periodo (\approx anni dopo la fine della missione) per gli astronauti. Come per qualunque altro progetto scientifico ed ingegneristico, è impensabile separare il progresso che porterà la sicurezza di questa tecnologia a convergenza, dagli incidenti, dagli errori di progettazione e dai guasti. Solo tramite questi eventi traumatici e, sfortunatamente, molto spesso violenti, si potranno evidenziare i difetti e le mancanze, e, così facendo, anche le loro soluzioni.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Joyce M. Evans, Charles F. Knapp e Nandu Goswami*, ARTIFICIAL GRAVITY AS A COUNTERMEASURE TO THE CARDIOVASCULAR DECONDITIONING OF SPACEFLIGHT: GENDER PERSPECTIVES. Pubblicato su “Frontiers in Physiology” nel 2018 da “Lorenza Pratali, Istituto di Fisiologia Clinica”
- [2] *Angelique Van Ombergen, Athena Demertzi, Elena S. Tomilovskaya*, THE EFFECTS OF SPACEFLIGHT AND MICROGRAVITY ON THE HUMAN BRAIN. Pubblicato su “Journal of Neurology” nel 2017 da “Springer”.
- [3] *Gilles R. Clément, Angelia P. Bukley and William H. Paloski*, ARTIFICIAL GRAVITY AS A COUNTERMEASURE FOR MITIGATING PHYSIOLOGICAL DECONDITIONING DURING LONG-DURATION SPACE MISSIONS. Pubblicato su “Frontiers in Systems Neuroscience” nel 2015 da “Ajitkumar Mulavara, Universities Space Research Association”.
- [4] *Millard F. Reschke, Gilles Clement*, VERBAL REPORTS OF NEUROVESTIBULAR SYMPTOMS IN ASTRONAUTS AFTER SHORT-DURATION SPACE FLIGHT. Pubblicato su “Acta Astronautica” nel 2018 da “Elsevier ltd”.
- [5] *Tsukasa Tominari, Ryota Ichimaru, Keita Taniguchi, Akane Yumoto, Masaki Shirakawa, Chiho Matsumoto, Kenta Watanabe, Michiko Hirata, Yoshifumi Itoh, Dai Shiba, Chisato Miyaura e Masaki Inada*, HYPERGRAVITY AND MICROGRAVITY EXHIBITED REVERSAL EFFECTS ON THE BONE AND MUSCLE MASS IN MICE. Pubblicato su “Scientific Reports” nel 2019 da “Nature research”.
- [6] *Steven T. Moore, André Diedrich, Italo Biaggioni, Horacio Kaufmann, Theodore Raphan, Bernard Cohen*, ARTIFICIAL GRAVITY: A POSSIBLE COUNTERMEASURE FOR POST-

FLIGHT ORTHOSTATIC INTOLERANCE. Pubblicato su “Acta Astronautica” nel 2005 da “Elsevier ltd”.

[7] *Gilles Clement*, INTERNATIONAL ROADMAP FOR ARTIFICIAL GRAVITY RESEARCH. Pubblicato online nel 2017 da “Nature Partner Journals”.

[8] *Ana Diaz Artilles, Thomas Heldt, Laurence R. Young*, EFFECTS OF ARTIFICIAL GRAVITY ON THE CARDIOVASCULAR SYSTEM: COMPUTATIONAL APPROACH. Pubblicato su “Acta Astronautica” nel 2016 da “Elsevier ltd”.

[9] *Grant R. Vincent, Jason Gruber, Micheal C. Newman, Torin K. Clark*, ANALYSIS OF ARTIFICIAL GRAVITY PARADIGMS USING A MATHEMATICAL MODEL OF SPATIAL ORIENTATION.