POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Fisica e Rugby, o Rugby e Fisica?

Original
Fisica e Rugby, o Rugby e Fisica? / Giorcelli, M., Sparavigna, A.C.. - ELETTRONICO. - (2025). [10.5281/zenodo.17761771]

Availability:
This version is available at: 11583/3005547 since: 2026-04-11T11:24:00Z

Publisher:

Published
DOI:10.5281/zenodo.17761771

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

01 November 2026

Fisica e Rugby, o Rugby e Fisica?

M. Giorcelli e A.C. Sparavigna

Politecnico di Torino

Questo articolo esplora in profondità la relazione tra il gioco del **Rugby** e i principi fondamentali della **Fisica**, dimostrando come le dinamiche in campo siano una manifestazione diretta delle leggi della meccanica classica e, sorprendentemente, offrano analogie efficaci per concetti complessi come la fisica delle particelle e la teoria dei sistemi complessi. L'analisi si basa su una serie di video didattici che sviscerano quattro aspetti cruciali del gioco:

1. **La Mischia Ordinata (Scrum)**, analizzata attraverso i **Tre Principi della Dinamica di Newton** (inerzia, forza/accelerazione e azione/reazione).
2. **La Dinamica Rotazionale**, spiegata dal concetto di **Momento Torcente** e **Momento d'Inerzia**.
3. **L'Aerodinamica del Pallone**, che applica l'**Equazione di Stato dei Gas Ideali** per la pressione, l'analisi **Vettoriale** per il paradosso del "passaggio in avanti" e l'**Effetto Magnus** per la stabilità del calcio.
4. **Il Rugby come Sistema Complesso** e come analogia per la **Fisica delle Particelle** (Modello Standard e Teoria delle Stringhe).

Attraverso calcoli e analisi strategiche, il lavoro quantifica l'accelerazione nella mischia (a circa g/16) e spiega il ruolo della tenacia giroscopica e della forma ovale del pallone per il volo. L'analisi quindi si sviluppa attraverso la discussione **Mischia Ordinata (*Scrum*)**, quantificata mediante i **Tre Principi della Dinamica di Newton**, con particolare attenzione alla **Forza di Attrito** come fattore limitante e alla **Dinamica Rotazionale** (Momento Torcente e Momento d'Inerzia) che spiega l'accelerazione angolare. Successivamente, si analizza l'**Aerodinamica del Pallone Ovale**, con ulteriore analisi del calcio e del lancio del pallone. Infine, il lavoro eleva l'analisi oltre la meccanica, inquadrando il rugby come un **Sistema Adattivo Complesso (CAS)** e stabilendo un'analogia concettuale con la **Fisica delle Particelle** (dove i giocatori sono *Fermioni* e il pallone/contatto sono *Bosoni*) e la **Teoria delle Stringhe**.

Il rugby emerge, in conclusione, non solo come una "palestra" per la meccanica di base, ma come un eccellente esempio di **sistema auto-organizzante** i cui schemi di interazione riflettono elegantemente i principi che governano l'universo a livello fondamentale.

DOI: 10.5281/zenodo.17761771

I Principi di Newton

Il web è ricco di video che illustrano il legame tra il gioco del Rugby e la Fisica. L'analisi dei video dimostrerà quanto profondo è il legame e rivelerà degli aspetti della fisica di base che nei corsi, anche universitari, non vengono generalmente affrontati. I video che ora prendiamo in considerazione, il primo è disponibile al link: https://www.youtube.com/watch?v=h2zwPie57hk, sono del **Prof. Enea Montoli**, docente di fisica e matematica presso il **Liceo Bottoni di Milano**, https://www.linkedin.com/in/eneamontoli/ . Il Prof. Montoli suggerisce come riferimenti per fisice e rugby i contenuti della pagina web https://www.renovatioquest.it/FisicaSport/index.html .

Segnaliamo inoltre, sempre del Prof. Montoli, un simulatore di mischia per pc sviluppato recentemente, al link https://www.renovatioquest.it/ScrumSimulator.html
Il video, intitolato **"La Fisica del Rugby: la mischia e il primo principio della dinamica - 001"**, fa parte di una serie di lezioni che applicano le leggi della fisica al gioco del rugby. Il focus di questo primo video è l'analisi della **mischia ordinata** attraverso il **Primo Principio della Dinamica (Principio di Inerzia)** di Newton.

Riassunto del Video: La Fisica della Mischia

1. **Definizione di Mischia (Scrum):**
    - La mischia nel rugby non è una "zuffa," ma un modo **ordinato e codificato** per riprendere il gioco dopo un'infrazione (come un "in avanti").
    - È composta da otto giocatori per squadra (avanti: prima, seconda e terza linea) che si legano e spingono insieme.
    - La palla viene introdotta nel tunnel centrale dal mediano di mischia (numero 9) e tallonata dal tallonatore (numero 2) all'indietro tra le gambe dei compagni.



In questa immagine si vede chiaramente il tunnel tra le squadre.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2014_Women%27s_Six_Nations_Championship_-_France_Italy_(51).jpg Licenza Immagine CC BY 3.0

2. **Applicazione del Primo Principio di Newton (Inerzia):**
    - Il principio afferma che un corpo rimane nello stato di quiete o di moto rettilineo uniforme se la **somma totale delle forze esercitate su di esso è zero**.
    - **Mischia Stabile:** Se la forza esercitata dalla mischia (ad esempio, la squadra Nera) è uguale in modulo e contraria alla forza esercitata dalla mischia avversaria (la squadra Rossa), la somma delle forze è zero. La mischia rimane **ferma** (a velocità zero). Questa è la situazione ideale per il mediano di mischia per gestire la palla.
    - **Spinta (Push-over):** Se una delle due squadre esercita anche solo per un istante una spinta leggermente maggiore, si crea un **disequilibrio di forza**. Quando la spinta maggiore cessa e le forze tornano in equilibrio, la mischia, a causa dell'inerzia, continua a muoversi nella direzione in cui è stata spinta, ma a **velocità costante** (moto rettilineo uniforme).
3. **Meta di Mischia (Push-over Try):**

- Questa spinta a velocità costante può portare la mischia a muoversi fino all'area di meta avversaria (meta di mischia), dove i giocatori possono schiacciare la palla e segnare.

Il video anticipa che il prossimo episodio approfondirà l'applicazione della **Seconda Legge di Newton** (forza e accelerazione) alla mischia.

https://www.youtube.com/watch?v=qJFBAkCSj0U (autore Enea Montoli)

Il secondo video si concentra appunto sull'applicazione di tale legge e della **quantità di moto** alla mischia del rugby. Il video, intitolato **"La Fisica del Rugby: la mischia e il secondo principio della dinamica - 002"**, analizza come le differenze di massa, velocità e forza si traducano in accelerazione all'interno della mischia.

La Seconda Legge della Dinamica nella Mischia

Il cuore dell'analisi è la **Seconda Legge di Newton**: $\Sigma \mathbf{F} = m \mathbf{a}$.

1. Massa, Velocità e Quantità di Moto [00:44]

- La Seconda Legge è espressa anche come variazione della **quantità di moto** ($\mathbf{p} = m \mathbf{v}$) nel tempo.
- Quando due mischie impattano, la mischia che prevale (e spinge l'altra indietro) è quella che ha una **quantità di moto maggiore** ($M V > m v$) [01:49].
- Questo crea un *tradeoff* tra la massa (peso) della mischia e la velocità con cui ingaggia. L'obiettivo è spingere l'altra mischia indietro attraverso una variazione della sua quantità di moto.

2. Calcolo della Forza e dell'Accelerazione [03:29]

Il video procede con un'analisi numerica per quantificare la spinta in una mischia.

- **Forza di Spinta:** Si assume, per ipotesi semplificativa, che ogni giocatore di mischia (8 in totale) abbia una massa di 100 kg e riesca a spingere con una forza equivalente al suo peso ($F = m g$, dove g è circa 10 m/s^2).
- **Forza Totale Ideale:** La forza totale teorica di una mischia sarebbe 8 \times (100 kg x 10 m/s^2) = 8.000 Newton [04:07].

3. Il Vantaggio Strategico del Tallonatore [04:49]

Qui entra in gioco un fattore strategico che crea il disequilibrio di forze:

- Se il mediano di mischia di una squadra (ad esempio, i Verdi) introduce la palla, il loro **tallonatore (numero 2) deve alzare un piede per tallonare la palla e non può spingere**.
- In quel momento, la squadra dei Verdi spinge solo con **7 giocatori**, mentre la squadra avversaria (i Blu) spinge ancora con **8 giocatori**.
- **Forza Netta:** Questa differenza crea una forza netta di spinta (la spinta di un solo giocatore) a favore della squadra che non sta inserendo la palla [05:18].

4. L'Accelerazione Resultante [05:38]

- Utilizzando la Seconda Legge, dove la forza netta è della massa M del giocatore per g e la massa totale del sistema è 16 M (le masse di entrambe le squadre), si calcola l'accelerazione:

  $a = M g / 16M = g / 16$

- Sostituendo g si ottiene un'accelerazione di circa **0,62 m/s^2** [06:19].
- Questa accelerazione provoca un movimento della mischia, portando la squadra perdente ad arretrare di circa **1,24 metri in due secondi** [07:34].

5. Direzione della Spinta (I Flanker) [09:07]

- Oltre al modulo della forza, conta la sua direzione. Mentre i primi cinque giocatori spingono generalmente dritti, i **due Flanker (numero 6 e 7)** hanno una maggiore libertà di angolare la loro spinta (θ).
- **Motivo Strategico:** Spingere ad angolo (es. 45°) riduce la componente di forza dedicata alla spinta in avanti ($F_{avanti} = F \cos(\theta)$), ma può essere usata tatticamente per tenere compatto il pacchetto o per **infastidire il mediano di mischia avversario** con le gambe, creando problemi al gioco [13:34].

In sintesi, la **Seconda Legge di Newton** spiega come il disallineamento strategico della forza e la successiva accelerazione siano gli elementi chiave che determinano se una mischia avanza, rimane ferma o arretra.

https://www.youtube.com/watch?v=bHRJfdJaMFI (autore Enea Montoli)

Questo terzo video completa l'analisi della mischia concentrandosi sul **Terzo Principio della Dinamica**, noto come principio di **Azione e Reazione**.

La Fisica del Rugby: La Terza Legge di Newton (Azione e Reazione)

Il video **"La Fisica del Rugby: la mischia e il terzo principio della dinamica - 003"** spiega come una mischia, quando è in difficoltà e viene spinta all'indietro, può evitare di arretrare sfruttando la fisica.

1. Il Principio di Azione e Reazione [00:07]

- Il Terzo Principio di Newton stabilisce che per ogni forza (azione) esercitata da un corpo su un secondo corpo, il secondo corpo esercita sul primo una forza (reazione) **uguale in modulo** e **opposta in verso**.

2. Ancoraggio al Terreno [01:13]

- Quando una mischia sta arretrando, l'azione intuitiva di cercare di fare passi in avanti è in realtà **molto rischiosa** [01:21].
  - **Pericolo 1:** Fare un passo stacca, anche se per un attimo, il piede dal terreno.
  - **Pericolo 2:** Staccando i piedi, la mischia non riesce a sfruttare il Principio di Azione e Reazione [01:34].
- **La Strategia Corretta:** Per fermare la ritirata (e per stabilizzarsi), i giocatori devono **bloccarsi** e **ancorarsi saldamente al terreno** [01:45].

3. La Terra come Risposta (Reazione) [02:07]

- Il punto cruciale è che il terreno funge da **punto d'appoggio esterno** (in termini di Fisica, diciamo forza esterna al sistema).
- Se la mischia che sta subendo la spinta si ancora al terreno, trasmette la spinta della mischia avversaria **direttamente alla Terra**.
- **La Reazione:** La Terra è in grado di rispondere a questa spinta con una forza uguale e contraria (la reazione) grazie alla sua **massa enorme** [02:44]. Di conseguenza, la mischia che spinge riceve una forza di reazione uguale e contraria a quella che sta producendo, senza che la mischia ancorata debba muoversi. Diventando "tutt'uno con la Terra" [02:30], la mischia bloccata riesce a fermare la spinta avversaria.

Questo video conclude la serie sui tre principi di Newton, spiegando che l'efficacia della mischia è un equilibrio dinamico di forze, accelerazione e sfruttamento del mondo esterno (la Terra) come punto di reazione finale.

Tuttavia, c'è ancora un concetto, che unisce la meccanica e la strategia, che spesso viene trascurato: **l'Importanza dell'Attrito (Forza di Attrito)** nella mischia.

La Forza di Attrito: Il Vero "Motore" della Mischia

Nel nostro documento si è analizzato il Terzo Principio di Newton (Azione e Reazione), ma la possibilità per i giocatori di applicare la forza necessaria dipende interamente dalla forza di attrito con il terreno.

1. **Attrito Statico come Limite:**
   - Quando gli avanti spingono nella mischia, la forza orizzontale che riescono a generare non può superare la **massima forza di attrito statico** ($F_{a, max}$) tra i tacchetti e il terreno.
   - La formula è: $F_{a, max} = \mu_s N$, dove N è la forza normale (principalmente il peso del gruppo di giocatori) e μ_s è il coefficiente di attrito statico.
2. **Tecnica come Ottimizzazione:**
   - Per massimizzare la forza di spinta, i giocatori (specialmente la prima linea) devono abbassare il loro **Centro di Massa (CM)** e spingere con un angolo che massimizzi la componente orizzontale della forza, assicurando al contempo che la loro spinta verso il basso **aumenti la forza normale N)**.
3. **Il Terreno Perfetto:**
   - È per questo che la scelta dei **tacchetti** e le condizioni del campo sono così vitali. Un campo fangoso (basso μ_s) riduce la massima forza di spinta applicabile, costringendo i pacchetti a concentrarsi più sulla stabilità che sulla potenza bruta.

Questo concetto fornisce la base fisica per la necessità strategica degli avanti di "ancorarsi" al terreno e usare la massa della Terra (come base non mobile) per sfruttare il principio di azione e reazione in modo efficace, e completa l'analisi della mischia oltre i soli principi newtoniani.

https://www.youtube.com/watch?v=USvccW7hRdw

Questo video conclude l'analisi della mischia concentrandosi sul **Momento Torcente** (o Torque), l'elemento fisico che spiega perché le mischie a volte **ruotano** su sé stesse.

La Fisica del Rugby: Il Momento Torcente

Il video **"La Fisica del Rugby: la mischia e il momento torcente - 004"** https://www.youtube.com/watch?v=USvccW7hRdw (autore Enea Montoli) analizza la dinamica rotazionale della mischia applicando i concetti di momento torcente e momento d'inerzia.

1. Il Concetto di Momento Torcente (τ)

Il momento torcente (**τ**) è l'equivalente rotazionale della forza: è ciò che induce un oggetto a ruotare.

- **Definizione:** Il momento torcente è dato dal prodotto della forza (F) per la distanza perpendicolare dal punto di rotazione, chiamata **braccio della forza (L)**: $\tau = F\ L$ [01:37].
- **Analogie:** Il video utilizza due analogie:
  - La **chiave inglese** che svita un bullone: più è lunga la chiave (maggiore L), minore è la forza F necessaria per ottenere lo stesso momento torcente [02:30].
  - L'**altalena** a bilico: se due bambini hanno masse diverse, il più pesante eserciterà un momento maggiore, facendo ruotare l'altalena [04:20].
- **Punto di Rotazione:** Nella mischia, il punto di rotazione (il **fulcro**) è approssimato alla **testa del tallonatore (numero 2)** [03:24].

2. Generazione del Momento Torcente nella Mischia

Affinché la mischia inizi a ruotare, deve esserci un **disequilibrio** di momento torcente [05:12].

- **Contributo dei Giocatori:** Non tutti i giocatori contribuiscono allo stesso modo al momento torcente. I giocatori più vicini al fulcro (il tallonatore e il numero 8) contribuiscono solo alla spinta in avanti, ma non alla rotazione (momento torcente zero) [05:59].
- **Ruolo dei Flanker:** I giocatori più lontani dal fulcro, in particolare i **Flanker (numeri 6 e 7)**, hanno un braccio L maggiore e, di conseguenza, esercitano il contributo maggiore al momento torcente [08:39].

3. Momento d'Inerzia e Accelerazione Angolare

Per determinare quanto rapidamente una mischia ruota, è necessario introdurre il concetto di **Momento d'Inerzia (I)**:

- **Momento d'Inerzia (I):** È l'analogo rotazionale della massa (inerzia). I dipende non solo dalla massa totale, ma da **come la massa è distribuita** rispetto all'asse di rotazione [09:36]. Una mischia più compatta (massa vicina al fulcro) avrebbe un momento d'inerzia minore e ruoterebbe più velocemente a parità di τ.
- **Calcolo:** Modellando le due mischie come un unico corpo (un parallelepipedo di massa M circa 1800 kg), il momento d'inerzia viene stimato intorno a **9750 kg m^2** [12:13].
- **Accelerazione Angolare (α):** Il momento torcente applicato genera un'accelerazione angolare: $\alpha = \tau / I$ [13:28].
- **Risultato:** Con i valori stimati, la mischia subisce un'accelerazione angolare di circa **13 al secondo quadrato** [14:10].
  - La rotazione è rapida: in soli **4 secondi**, la mischia può ruotare di oltre 100° ($\theta = 1/2\ \alpha\ t^2$) [16:23].

Conclusione Tattica: Far ruotare la mischia è un'importante strategia di gioco perché, alterando l'angolo, si mette in crisi la squadra avversaria, riducendo le sue possibilità di giocare la palla in modo

efficace [14:49]. La rotazione può essere favorita strategicamente da un flanker che riduce leggermente la spinta, creando il disequilibrio necessario [17:09].

Non vi sono solo i principi di Newton ed il momento torcente nel Rugby.

https://www.youtube.com/watch?v=FWEpNI7D7fA&t=315s
Il video, intitolato **"Speciale prima lezione 'La Fisica del Rugby'"** e tenuto da Francesco Gonella ed Elti Cattaruzza, Università Ca' Fiscari, Venezia, esplora come i principi fondamentali della fisica e della teoria dei sistemi complessi spieghino diversi aspetti del gioco del rugby.

Punti Salienti della Lezione

La presentazione usa il rugby come una "palestra" per illustrare concetti di **meccanica classica** e di **sistemi complessi**.

La Pressione del Pallone e la Legge dei Gas Ideali

- **Pressione Interna:** La lezione inizia analizzando la pressione del pallone da rugby. Il regolamento richiede una **sovrapressione** (pressione relativa) di circa 65-68 kPa [04:11].
- **Variazione di Temperatura:** Viene applicata l'**equazione di stato dei gas ideali** () per dimostrare cosa accade quando il pallone viene spostato da uno spogliatoio caldo (es. +27°C o 300 K) a un campo freddo (es. -3°C o 270 K) [08:43].
- **Risultato:** A causa del calo di temperatura, la pressione interna del pallone diminuisce di circa il **10%** [13:58], rendendolo meno gonfio e non conforme alle regole, un fatto noto a chi prepara i palloni.

Vettori e il Paradosso del Passaggio in Avanti

- **Velocità Vettoriale:** La velocità è una **quantità vettoriale** (ha modulo, direzione e verso) [21:47], cruciale per comprendere la regola del passaggio.
- **Spiegazione dell'In Avanti:** Se un giocatore (14) passa il pallone all'indietro (**V_lancio**), ma sta correndo in avanti (**V_giocatore**), la **velocità risultante** (**V_totale**) del pallone rispetto al terreno è data dalla **somma vettoriale** delle due velocità. Nonostante il lancio sia all'indietro, il vettore risultante può portare il pallone a essere preso più avanti rispetto al punto di lancio [22:51]. Questo dimostra che il passaggio non è "in avanti" (il lancio è all'indietro rispetto al lanciatore) anche se il ricevitore lo afferra più avanti.

Tenacia Giroscopica e Stabilità del Passaggio

- **Lancio in Rotazione:** Per passaggi di media o lunga distanza, è essenziale imprimere al pallone uno **spin** (rotazione) [33:55].
- **Effetto Girosocpio:** La rotazione conferisce al pallone **tenacia giroscopica** (o stabilità), una proprietà legata alla **conservazione del momento angolare** [35:40]. Questo impedisce che il pallone devii a causa delle fluttuazioni dell'aria, mantenendo l'asse di rotazione stabile e rendendo la traiettoria più precisa per il ricevitore [39:51].

Le Forze sul Pallone Calciato e l'Effetto Magnus

- **Forze in Gioco:** Su un pallone calciato agiscono la **forza peso**, la **spinta di Archimede**, la **forza d'attrito** (che si oppone al moto) e la **forza di Magnus** [49:57].
- **Effetto Magnus:** Se il pallone ruota (es. all'indietro in un calcio di punizione), trascina con sé l'aria, creando una differenza di pressione che genera una **forza di portanza (lift)**, perpendicolare al vettore velocità [51:17].
- **Traiettoria Reale:** L'effetto Magnus fa sì che il pallone rimanga in aria più a lungo e modifica la traiettoria, rendendola non più perfettamente parabolica (come nel vuoto), ma asimmetrica [53:40].

Il Rugby come Sistema Complesso

- **Rete di Feedback:** Il rugby viene definito come un eccellente esempio di **sistema complesso** [57:42].
- **Adattabilità:** La complessità deriva dalla **rete di feedback** tra i 15 giocatori, dove l'azione di un singolo elemento (ad esempio, un infortunio o una modifica tattica) influenza il comportamento di tutti gli altri, costringendo la squadra a un processo di **auto-organizzazione e adattamento** [01:03:06]. La squadra di rugby, a differenza di un sistema più semplice, "non muore" se un componente fallisce, ma si riarrangia.

L'effetto Magnus e la forma ovale del pallone da rugby sono strettamente correlati, soprattutto per quanto riguarda la stabilità della traiettoria durante i calci e i passaggi lunghi. L'effetto Magnus è il fenomeno fisico per cui un **corpo in rotazione** che si muove in un fluido (come l'aria) sperimenta una **forza perpendicolare** alla direzione del moto.

L'Effetto Magnus in Dettaglio

Questo effetto è causato da una differenza di pressione creata dalla rotazione del corpo:

1. **Flusso d'Aria Asimmetrico:** Quando il pallone ruota, l'aria viene trascinata intorno alla sua superficie.
2. **Aumento di Velocità del Flusso:** Sul lato del pallone dove il movimento di rotazione si aggiunge alla velocità del flusso d'aria (aria che scorre nella direzione del moto del pallone), la velocità del flusso aumenta.
3. **Diminuzione di Pressione (Principio di Bernoulli):** Secondo il **Principio di Bernoulli**, all'aumentare della velocità di un fluido, la sua pressione diminuisce.
4. **Forza Risultante:** Viceversa, sul lato opposto, la rotazione rallenta il flusso d'aria e la pressione aumenta. La differenza di pressione tra i due lati genera una **forza netta** (la forza di Magnus) che agisce perpendicolarmente alla direzione del moto.

Nel rugby, se un giocatore imprime una rotazione all'indietro (**backspin**) al pallone durante un calcio piazzato, la forza di Magnus è diretta verso l'alto. Questo crea una **portanza** (lift) che contrasta parzialmente la forza di gravità e la resistenza dell'aria (attrito), permettendo al pallone di rimanere in volo più a lungo e di raggiungere distanze maggiori, come evidenziato nel video.

Il Ruolo della Forma Ovale (Sfera vs. Ovale)

La forma ovale del pallone (un ellissoide prolato) ha un impatto cruciale sulla possibilità di sfruttare l'effetto Magnus e sulla stabilità del volo:

1. Stabilità Aerodinamica

- **Senza Rotazione (Palla Morta):** Un pallone sferico non in rotazione offre una resistenza (drag) più uniforme. Un pallone ovale non in rotazione è altamente instabile e tende a oscillare in modo imprevedibile (**tumbling**), offrendo una grande resistenza all'avanzamento.
- **Con Rotazione (Stabilità Giroscopica):** La forma ovale, se lanciata correttamente con una **rotazione lungo l'asse maggiore** (il cosiddetto *spin* a spirale), diventa estremamente stabile. Questo è dovuto al **momento angolare** (tenacia giroscopica), che stabilizza l'asse di rotazione, molto più efficacemente di quanto farebbe una palla sferica in rotazione sul suo asse maggiore.

2. Rotazione Ottimizzata per l'Attrito

- Quando il pallone ovale ruota correttamente, presenta il suo **profilo più affusolato** (il cono generato dalla rotazione) all'aria. In questo modo, riduce al minimo l'**attrito** (drag) rispetto al suo profilo completo se non ruotasse affatto.

3. Direzionalità della Forza di Magnus

- La forma ovale permette ai giocatori di imprimere una rotazione che è **controllata e prevedibile**. Nel caso dei calci di precisione, la rotazione all'indietro (backspin) non solo stabilizza il pallone lungo il suo asse di volo, ma genera anche la forza di Magnus in modo da ottimizzare la traiettoria, come discusso nella lezione.

In sintesi, la forma ovale del pallone *richiede* la rotazione per avere un volo stabile e rende più efficiente l'uso dell'effetto Magnus e la gestione dell'attrito rispetto a una palla sferica.

Ed ora parliamo del volo del pallone ovale del rugby che è un argomento affascinante in cui l'**aerodinamica** incontra la **dinamica rotazionale**, come già accennato. A differenza di un pallone sferico, la sua forma irregolare produce un comportamento in volo altamente variabile e, in parte, imprevedibile.

Ecco un'analisi dettagliata degli aspetti fisici che governano il volo del pallone da rugby.

La Forma Ovale e il Centro di Pressione

Il pallone da rugby è un **sferoide prolato**, e la sua forma non è casuale: è pensata per rendere la gestione e il placcaggio più difficili e per favorire il gioco con il piede (il calcio).

Comportamento in Volo

Quando il pallone viene calciato, l'aria che lo investe genera forze aerodinamiche che dipendono dall'orientamento:

1. **Volo Stabile (Calcio Piazzato, Calcio Drop):** Se il pallone è calciato in modo da farlo **ruotare lungo il suo asse maggiore** (la punta) – come avviene in un calcio piazzato (*place kick*) o un calcio di rimbalzo (*drop kick*) eseguito correttamente – la rotazione agisce come un **giroscopio**. Questo effetto stabilizzante, basato sul principio di **conservazione del momento angolare**, impedisce che l'asse di rotazione cambi rapidamente, mantenendo la palla sulla sua traiettoria il più a lungo possibile.
2. **Volo Instabile (*Wobble* / Rimbalzo Casuale):** Se il pallone è calciato o lanciato con una rotazione imperfetta o lungo un asse non allineato con la direzione del moto, l'interazione con l'aria provoca una rapida variazione del **centro di pressione (ne parliamo più avanti)**. Il pallone inizia a oscillare in modo caotico (*wobble*), e la sua traiettoria diventa imprevedibile. Questo è spesso un vantaggio tattico nel calcio in attacco (*up-and-under* o *box kick*), poiché rende estremamente difficile per il ricevitore avversario giudicare il punto di caduta.

L'**Effetto Magnus**, di cui si è già detto, ricordiamo che è il fenomeno cruciale che influenza la traiettoria di qualsiasi oggetto in rotazione in un fluido (come l'aria), e nel rugby è fondamentale per i calci di precisione.

Applicazione nel Rugby

- **Curva (*Bend*):** Un calcio che imprime una rotazione laterale può far curvare la palla attorno alla linea difensiva.
- **Calcio Drop/Piazzato:** Se un battitore (come un Mediano d'Apertura) imprime una leggera **rotazione all'indietro (*backspin*)** al pallone, l'Effetto Magnus crea una **forza di portanza (lift)** che agisce verso l'alto. Questa forza contrasta parzialmente la forza di gravità e la resistenza aerodinamica, permettendo al pallone di rimanere in aria più a lungo e raggiungere distanze maggiori.

Le condizioni interne del pallone sono regolate dalla **Legge dei Gas Ideali** ($pV = nRT$), che collega pressione, volume e temperatura.

- **Pressione e Stabilità:** Una pressione corretta (spesso compresa tra 65,7 e 68,8 kPa) è cruciale. Una palla troppo sgonfia ha meno stabilità giroscopica e assorbe più energia all'impatto (meno rimbalzo), mentre una palla troppo gonfia è più difficile da placcare.
- **Variazione con la Temperatura:** La pressione interna è direttamente proporzionale alla temperatura. Durante una partita giocata in condizioni fredde, la **diminuzione della temperatura (T)** fa **diminuire la pressione (p)** del gas all'interno (aria) se il numero di moli (n) e il volume (V) sono costanti. Questo comporta che in inverno il pallone possa risultare leggermente più "molle" se non rigonfiato regolarmente.

In conclusione, il volo del pallone da rugby è un equilibrio dinamico tra la **spinta iniziale** (forza e momento torcente impressi dal calciatore), la **resistenza dell'aria**, la **forza di gravità** e la **forza di Magnus** (effetto di rotazione). Questa complessa interazione è ciò che rende il calcio nel rugby una combinazione di abilità atletica e profonda conoscenza, anche se inconscia, dei principi fisici.

Il **Centro di Pressione (CP)** è un concetto fondamentale dell'aerodinamica che spiega in modo preciso dove e come le forze generate dal flusso d'aria agiscono su un oggetto, come il pallone ovale del rugby.

In termini semplici:

Il Centro di Pressione è il punto su un corpo (in questo caso, il pallone ovale) attraverso il quale passa la forza aerodinamica totale risultante (la somma vettoriale di tutte le forze di pressione e attrito esercitate dall'aria sul corpo).

Quando si analizza il volo di un oggetto, si considerano due punti chiave:

1. Centro di Massa (o Centro di Gravità)

È il punto in cui si può considerare concentrata tutta la massa dell'oggetto. È il punto attorno al quale agisce la **forza di gravità**. Nel pallone, se la massa è distribuita uniformemente, questo punto si trova al suo centro geometrico.

2. Centro di Pressione (CP)

È il punto in cui agisce la **forza aerodinamica totale** (la forza che l'aria esercita sull'oggetto). Questa forza include:

- La **Portanza (*Lift*)**: La forza perpendicolare alla direzione del moto.
- La **Resistenza (*Drag*)**: La forza parallela ma opposta alla direzione del moto.

La Stabilità e l'Instabilità del Pallone Ovale

La relazione tra il **Centro di Pressione (CP)** e il **Centro di Massa (CM)** determina se il volo di un oggetto è stabile o instabile.

Instabilità (Volo Caotico)

A differenza di un razzo o di un aereo, dove il CP si trova *dietro* il CM per garantire la stabilità, un pallone ovale lanciato o calciato **non ha un CP fisso**.

1. Se il pallone viaggia senza rotazione o con una rotazione laterale, la sua forma irregolare fa sì che il CP **si sposti continuamente**.
2. Quando il **CP non coincide con il CM**, si genera un **momento torcente** aerodinamico. Questo momento torcente fa ruotare il pallone (o ne fa cambiare l'orientamento) in modo da allineare la sua punta verso la direzione del moto, proprio come una banderuola cerca di allinearsi con il vento.
3. Tuttavia, poiché il pallone ovale non è simmetrico rispetto al flusso d'aria, questo momento torcente innesca una **continua oscillazione** (*wobble*), rendendo la traiettoria imprevedibile. **È la causa principale del volo caotico e dei rimbalzi inattesi.**

Stabilità (Volo Giroscopico)

Nel rugby, l'instabilità viene contrastata con la **rotazione lungo l'asse maggiore** (il principio del **giroscopio**).

- Quando il pallone è calciato in modo che ruoti velocemente attorno al suo asse lungo, l'effetto giroscopico (**conservazione del momento angolare**) diventa la forza dominante.
- Questa forza mantiene l'orientamento del pallone fisso nello spazio (la **tenacia giroscopica**), impedendo che il momento torcente aerodinamico, causato dallo spostamento del CP, possa rovesciare o far oscillare in modo incontrollato il pallone. Questo garantisce un calcio lungo e diritto.

In sintesi, la dinamica del volo del pallone da rugby è una lotta tra la tendenza destabilizzante del Centro di Pressione a spostarsi (generando momenti torcenti) e la forza stabilizzante della rotazione giroscopica.

Come calciare il pallone

Il modo in cui viene calciato il pallone da rugby (il **calcio ovale**) è una delle azioni più complesse e affascinanti dal punto di vista della fisica. La tecnica varia notevolmente a seconda dell'obiettivo: ottenere punti, guadagnare campo, o mettere in difficoltà la difesa avversaria.

Ecco i principali tipi di calcio e come la fisica li rende possibili:

1. Calcio Piazzato (Penalty Kick / Conversion)

Questo calcio è utilizzato per ottenere punti dopo una meta (trasformazione) o un fallo grave (calcio di punizione). L'obiettivo è la **massima precisione e distanza**.

La Tecnica:

- Il pallone è posizionato a terra su un **tee** (un supporto, a volte un cumulo di sabbia o erba) per inclinarlo leggermente in avanti.
- Il calciatore colpisce il pallone con il **collo del piede (dorso)**, mirando al "ventre" dell'ovale.

La Fisica:

- **Rotazione Assiale (Giroscopica):** Il calciatore imprime una **rotazione lungo l'asse maggiore** del pallone (la punta). Questa rotazione è cruciale.
- **Tenacia Giroscopica:** Come discusso, la rapida rotazione agisce come un **giroscopio**, creando una **tenacia giroscopica** (conservazione del momento angolare). Questa forza stabilizza l'orientamento del pallone, contrastando la tendenza destabilizzante del Centro di Pressione a spostarsi.
- **Effetto Magnus per la Distanza:** Spesso, il calciatore imprime anche un leggero **"backspin"** (rotazione all'indietro). L'Effetto Magnus generato da questa rotazione crea una **forza di portanza (lift)** verso l'alto, che aiuta il pallone a resistere alla gravità e a volare più lontano e più a lungo.



Calcio piazzato.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ST_vs_CO_2012-03-10_-_42_-_Conversion_kick_by_Luke_McAlister.jpg Licenza Free Art License

2. Calcio Drop (Drop Kick)

Questo calcio può essere usato per un **Drop Goal** (3 punti, durante l'azione di gioco) o per riprendere il gioco (calcio d'inizio o di rinvio).

La Tecnica:

- calciatore deve **far cadere il pallone a terra** e colpirlo immediatamente al volo.
- L'impatto deve avvenire in modo che il pallone si alzi rapidamente, spesso colpendo con il collo del piede sulla **punta inferiore** dell'ovale.



https://picryl.com/media/a-japan-self-defense-force-naha-rugby-football-club-9c9b8d Licenza Public Domain, oppure vedere https://youtu.be/4tT0ewpLALo

La Fisica:

- **Impatto e Conservazione della Quantità di Moto:** L'energia e la quantità di moto del calciatore vengono trasferite al pallone in un istante. L'obiettivo è minimizzare la perdita di energia causata dal rimbalzo sul terreno.
- **Traiettoria e Angolo di Attacco:** Un **angolo di lancio più piatto** è necessario per un Drop Goal (per farlo passare sotto la traversa e sopra il campo da gioco), ma un **angolo più alto** è preferito per i calci di ripresa del gioco (per guadagnare tempo per la corsa della squadra).

3. Calcio Tattico (Punt Kick, Up-and-Under, Box Kick)

Questi calci sono usati per guadagnare terreno o per **mettere pressione** sulla difesa avversaria.

La Tecnica:

- Il calciatore tiene il pallone in mano e lo lascia cadere per colpirlo prima che tocchi terra (un *punt kick*).
- A seconda dell'obiettivo, l'impatto è diverso:
    - **Calcio Lungo (Punt):** Colpito più sul dorso, per una rotazione stabile e massima distanza.

- **"Up-and-Under" o "Box Kick" (Alto e Corto):** Colpito più in punta, con l'obiettivo di massimizzare l'altezza e far cadere il pallone nel campo avversario con il **minimo preavviso**.

La Fisica:

- **Massimizzare l'Instabilità:** A differenza del calcio piazzato, l'obiettivo tattico è spesso generare un volo **instabile e caotico** (il *wobble* o "palla che sfarfalla").
- **Centro di Pressione (CP) Vario:** Colpire la palla in punta o in modo laterale impedisce l'imprinting di una rotazione giroscopica stabilizzante. Di conseguenza, il **Centro di Pressione si sposta continuamente**, generando un momento torcente che fa oscillare rapidamente l'ovale.
- **Rimbalzo Imprevedibile:** La forma ovale combinata con un volo instabile assicura che, al momento dell'impatto con il terreno, il rimbalzo sia **altamente casuale e imprevedibile**, rendendo estremamente difficile la ricezione per l'Estremo avversario.

In sintesi, ogni calcio è un'applicazione calcolata (spesso intuitiva, ma basata sulla fisica) di forza, angolo e rotazione per ottenere l'effetto aerodinamico desiderato.

Come lanciare il pallone da rugby

Anche se il gioco del rugby è dominato dai calci e dalle corse, il lancio con le mani è fondamentale e, sorprendentemente, è l'unica parte in cui una regola specifica del rugby modifica la meccanica fondamentale del lancio (o meglio, lo condiziona).

Il lancio del pallone da rugby si suddivide in due categorie principali: il **Passaggio all'Indietro** (legale) e il **Passaggio in Avanti** (illegale, chiamato *in avanti* o *knock-on*).

1. Il Passaggio all'Indietro (Legale)

Il regolamento del rugby impone che un giocatore in movimento possa passare il pallone a un compagno solo se la palla **viaggia all'indietro** (verso la propria linea di meta) rispetto al giocatore che lancia.

La Tecnica e la Meccanica:

- **Il Lancio all'Indietro:** Per garantire che il pallone si muova all'indietro, il giocatore deve **lanciarlo con forza orizzontale diretta all'indietro** rispetto al proprio corpo.
- **La Rotazione a Spirale (*Spiral Pass*):** Per massimizzare la velocità, la precisione e la distanza del passaggio, il pallone viene lanciato con una forte **rotazione a spirale** attorno al suo asse maggiore. Questa tecnica ha tre vantaggi fisici:
    1. **Stabilità:** La rotazione agisce come un **giroscopio**, stabilizzando il volo del pallone e mantenendolo sulla linea di mira, prevenendo l'oscillazione (*wobble*) causata dalla sua forma ovale.
    2. **Riduzione della Resistenza:** La rotazione a spirale presenta il profilo più sottile del pallone alla resistenza dell'aria, **riducendo l'attrito (drag)** e consentendo al pallone di viaggiare più velocemente e più lontano.
    3. **Velocità:** Permette al ricevente di catturare la palla in corsa con il minor tempo di reazione possibile.

Il Paradosso Vettoriale:

L'elemento più interessante dal punto di vista della fisica è il **moto relativo** del giocatore che corre.

- Un giocatore che corre a v_g (ad esempio 8 m/s}) e lancia la palla all'indietro a v_p (ad esempio 1 m/s) rispetto a sé stesso, fa sì che la velocità assoluta della palla rispetto al terreno sia:

{**v**}_{assoluta}} = {**v**}_g + {**v**}_p

- Poiché {**v**}_g è molto maggiore e diretto in avanti, la palla, pur essendo lanciata all'indietro rispetto al giocatore, **continua a muoversi in avanti rispetto al terreno** (ad esempio a 7 m/s). Questo è ciò che permette al gioco di progredire, mantenendo il passaggio *legale*.

2. Il Passaggio in Avanti (*In Avanti*)

Il passaggio in avanti (lancio volontario in avanti) o l'errore (*knock-on*, caduta involontaria in avanti) sono puniti con una mischia per la squadra avversaria.

La Meccanica:

- Lanciare intenzionalmente in avanti significa imprimere una **componente di velocità assoluta** che supera la velocità di corsa del giocatore o che è diretta in modo netto verso la linea di meta avversaria.
- L'infrazione è definita dal punto in cui la palla **lascia le mani** del giocatore. Se la palla viene lanciata all'indietro (rispetto alle mani che la lasciano) ma il vento la spinge in avanti o cade in avanti dopo il contatto con il terreno, il lancio è comunque *legale* a patto che non tocchi il terreno prima di essere ricevuta.

In conclusione, la fisica del lancio nel rugby è dominata dalla necessità di una **rotazione stabilizzante (spirale)**, combinata con una consapevolezza del **moto vettoriale relativo** per garantire che il passaggio, pur avanzando sul campo, sia sempre diretto all'indietro rispetto al portatore di palla.

La spirale perfetta

Approfondiamo il momento in cui la mano e il pallone interagiscono per generare la rotazione a spirale. Questa è la parte dove la biomeccanica del polso e delle dita applica il **Momento Torcente** in modo strategico.

Il Momento Torcente per la Spirale Perfetta

L'obiettivo della spirale è trasformare l'energia di spinta del braccio in energia rotazionale, garantendo che la palla abbia la stabilità giroscopica necessaria per volare lontano e dritto.

1. Il Momento del Rilascio

Il braccio e la spalla forniscono la **forza primaria** (F) che dà al pallone la sua velocità lineare. Tuttavia, è l'azione del polso e delle dita (il "colpo di frusta") nell'ultimo istante che crea il **Momento Torcente (τ)** necessario per la rotazione.

Il Momento Torcente, in fisica, lo abbiamo definito prima.

2. L'Applicazione del Momento (Il "Grip")

Per generare una spirale efficace, il giocatore tiene il pallone con le dita posizionate lungo le cuciture (i "lacci") dell'ovale.

1. **Impronta di Pressione:** Durante il lancio, la maggior parte della forza è concentrata sul retro e sul fianco della palla.
2. **Il "Leveraggio" (Braccio di Leva):** L'ultimo punto di contatto non è il palmo, ma le **punte delle dita** (soprattutto indice e medio). Le dita agiscono come una leva, massimizzando il braccio (nel senso fisico) per l'applicazione della forza rotazionale.
3. **La Forza Tangenziale (F):** Nell'istante del rilascio, la rotazione finale del polso e della mano fa sì che le dita "scivolino" via dalla palla con una spinta **tangenziale** (perpendicolare all'asse di lancio).
4. **Massimizzazione di τ:** Questa spinta tangenziale (il *flick*) massimizza il Momento Torcente e di conseguenza la massima accelerazione angolare. La palla viene quindi lanciata con l'asse lungo perfettamente allineato al senso di marcia.

3. Effetto sull'Asse di Rotazione

Se il Momento Torcente è applicato perfettamente, il pallone ruota intorno al suo asse maggiore. Il suo **Momento d'Inerzia** attorno a questo asse è il più piccolo possibile (I_{min}).

- Poiché la Rotazione Angolare ω è legata al Momento Angolare (L) dalla formula L = I ω, il Momento Torcente agisce per massimizzare ω$ attorno all'asse più "facile" da far girare, garantendo così la massima stabilità giroscopica e la traiettoria più rettilinea.

Il risultato è che l'ovale non si scompone in un'oscillazione laterale (*wobble*), ma mantiene l'asse di volo bloccato in posizione, volando diritto verso il ricevente. È un capolavoro di coordinazione e di applicazione involontaria ma precisa dei principi della dinamica rotazionale.

Un Sistema Complesso

Approfondiamo anche l'analisi del **Rugby come Sistema Complesso** basandoci sui concetti che prima abbiamo trattato e sul contesto della teoria della complessità.

Il rugby, con i suoi 30 giocatori in campo, le regole in evoluzione e l'ambiente non-lineare, è un perfetto esempio di **Sistema Adattivo Complesso (CAS - Complex Adaptive System)**, proprio come un ecosistema, un mercato finanziario o il cervello umano.

Un sistema complesso è caratterizzato da alcuni elementi fondamentali, che nel rugby sono evidenti:

1. Alto Numero di Elementi Interagenti

Il sistema è composto da un gran numero di elementi (i 15 giocatori per squadra, l'arbitro, il pallone, il terreno) che interagiscono tra loro in modi non-lineari.

- **Diversificazione dei Ruoli:** I giocatori non sono entità omogenee. Il sistema si basa su una **specializzazione gerarchica** (avanti vs. trequarti), dove il fallimento di un sottosistema (ad esempio, la mischia, composta dagli avanti) può mettere in crisi l'intero sistema offensivo o difensivo.
- **Interazioni Locali:** La maggior parte delle decisioni e delle azioni (il placcaggio, la *ruck*, la *maul*) sono **interazioni locali** tra pochi giocatori. Tuttavia, l'effetto di queste interazioni si propaga rapidamente attraverso l'intera squadra, influenzando la disposizione della linea difensiva o la scelta del gioco d'attacco successivo.
- **Comportamento Emergent**e: L'azione collettiva di tutti i 15 giocatori produce una **strategia di squadra** (il modo in cui la squadra attacca o difende) che non è semplicemente la somma delle abilità individuali, ma un **comportamento emergente** frutto delle loro interazioni.

2. La Rete di Feedback (Retroazione)

La caratteristica più distintiva di un CAS è l'esistenza di **catene di retroazione (feedback)** che rendono impossibile calcolare lo stato futuro del sistema in modo lineare.

- **Feedback Negativo (Stabilità/Equilibrio):**
  - **Esempio: La Difesa.** Quando la squadra perde terreno o subisce una pressione eccessiva, il sistema difensivo reagisce compattandosi, riorganizzando la linea (salita) e aumentando la pressione sui portatori di palla avversari. Questo è un **feedback negativo** perché mira a **riportare il sistema a uno stato di equilibrio** (recupero del possesso o interruzione del gioco avversario).
- **Feedback Positivo (Amplificazione/Divergenza):**
  - **Esempio: L'Attacco Continuo.** Una volta che una squadra riesce a penetrare la difesa avversaria, le giocate successive (passaggi rapidi, *offload*) portano ad una **rete di sostegno** che amplifica il successo iniziale, creando un'onda d'urto difficile da fermare. Questo è un **feedback positivo** che porta il sistema a **divergere** dallo stato di equilibrio precedente, creando un vantaggio decisivo e, potenzialmente, una meta.

L'imprevedibilità del rugby deriva proprio dal complesso intreccio di questi anelli di feedback.

3. Auto-Organizzazione e Adattamento

A differenza di una macchina, un sistema complesso non ha un comando centrale che detta ogni mossa. I giocatori devono **auto-organizzarsi** e **adattarsi** continuamente.

- **Decision-Making Distribuito:** La decisione di calciare, placcare, o passare la palla non è presa da un unico "computer" centrale, ma è distribuita e presa da ogni giocatore in base al suo ambiente sensoriale e al **modello mentale condiviso** (la strategia di squadra).
- **Risposta al "Rumore":** Nel contesto fisico, il "rumore" può essere un rimbalzo imprevedibile del pallone ovale, un placcaggio fallito, o l'espulsione temporanea di un giocatore. Il sistema rugbistico dimostra una notevole **resilienza** perché è in grado di **assorbire questi shock** e riorganizzarsi (attraverso l'uso di riserve o la modifica tattica in corsa) senza collassare, continuando a perseguire il suo obiettivo finale (fare meta).
- **Apprendimento Adattivo:** Come accennato, un sistema complesso è **adattivo**: la squadra che impara e si adatta più velocemente alle circostanze imprevedibili del campo e alle mosse dell'avversario è quella che ha successo.

Il Giocatore singolo

La tesi di laurea intitolata "Valutazione Biomeccanica della Corsa nei Giocatori di Rugby ai fini della Prevenzione degli Infortuni" di Rui Martina è un documento è altamente pertinente per il nostro progetto "Fisica e Rugby", in quanto sposta il focus dalle fasi statiche (come la mischia e i principi di Newton) e dal volo del pallone (aerodinamica) alla **dinamica del movimento del corpo umano** nel gioco. Ecco i concetti e i dati più importanti.

1. Aspetti Fisici/Biometrici Fondamentali

La tesi tratta l'analisi del movimento, che è un ramo della biomeccanica che utilizza la fisica per misurare il gesto atletico.

- Centro di Massa (CoM): La tesi basa l'intera analisi sulla valutazione della cinematica del Centro di Massa (CoM). Questo concetto fisico, cruciale per la dinamica del corpo, viene approssimato posizionando un marker sulla vertebra L5. Potete usare questo per spiegare come il moto del baricentro del giocatore sia monitorato e come influenzi la corsa e l'efficienza.
- Variabili Calcolabili: Il metodo di video analisi permette di calcolare variabili direttamente correlate alla fisica del movimento, che integrano bene la sezione sui Principi di Newton:
    - Centro di Pressione (CoP): Viene esplicitamente citato come una variabile calcolabile dai dati del CoM.
    - Forze di Reazione al Suolo (GRF): Anch'esse calcolabili dal moto del CoM.
    - Cinematica della Corsa: Lunghezza del passo, cadenza e tempi di contatto.

2. Differenze Dinamiche tra Categorie

La parte dei risultati fornisce dati biomeccanici specifici, che evidenziano una correlazione tra maturità atletica e assetto di corsa (dinamica verticale), un punto molto interessante per il documento.

- Velocità di Avanzamento e Oscillazioni Verticali: Sono state registrate velocità maggiori negli atleti Under 16 e Under 18 rispetto alla Prima Squadra. Inoltre, l'Under 16 ha mostrato le maggiori oscillazioni verticali del CoM.
- Andamento Verticale del CoM durante lo Sprint (Dinamica Verticale):
    - Giovanili (U16/U18): Il CoM ha seguito una traiettoria crescente, partendo da una posizione più bassa e arrivando a una più alta.
    - Prima Squadra (Senior): Il CoM ha mostrato un andamento opposto, decrescente.

Questi risultati suggeriscono una diversa strategia di sprint e di efficienza energetica nella corsa tra atleti in fase di sviluppo e atleti senior, un punto eccellente per collegare la biomeccanica alla performance nel rugby.

3. Contesto e Dettagli del Rugby

- Il Rugby come Sport di Corsa: Viene confermato che la corsa (i "minuti di transizione") copre un ruolo importante nel match.
- Differenziazione dei Ruoli (Fisica del Corpo): La tesi ribadisce che le qualità fisiche variano in base al ruolo:
    - Avanti (*Forwards*): Maggiore forza assoluta (necessaria per il contatto, ad esempio in mischia). Maggiore potenza nella muscolatura del tronco e degli arti superiori.

    - Trequarti (*Backs*): Migliore potenza muscolare degli arti inferiori (necessaria per scatti e salti, come ricevere il pallone).
- Metodologia "Ecologica": Potete citare la metodologia utilizzata (analisi video con telecamere GoPro) come un esempio di come oggi sia possibile fare analisi biomeccanica complessa, non invasiva ed economica, direttamente sul campo da gioco (*ecologica*).

Questi punti, specialmente la correlazione tra l'andamento verticale del CoM e la categoria/età, offrono una prospettiva biomeccanica e dinamica concreta da aggiungere ai principi della meccanica e dell'aerodinamica che avevate già individuato.

La Fisica delle Particelle

Aggiungiamo anche la fisica delle particelle.

https://www.youtube.com/watch?v=fj3tNpepJB8

Questo video del canale "La Fisica Che Ci Piace" è una lezione Professor Vincenzo Schettini dedicata al **Modello Standard della Fisica delle Particelle** e alla **Teoria delle Stringhe**, usando analogie molto efficaci come il rugby e l'orchestra. Il titolo è “le PARTICELLE ELEMENTARI giocano a RUGBY??!?”

Ecco un riassunto dettagliato dei concetti chiave presentati nel video:

Il Modello Standard: I Giocatori e la Palla da Rugby

Il cuore del Modello Standard è la divisione delle particelle elementari in due grandi categorie, paragonate ai due elementi fondamentali di una partita di rugby:

1. I Giocatori: I Fermioni (Massa/Materia)

I **Fermioni** sono le particelle che **costituiscono la materia**, dotate di massa [14:15].

- **Mattoncini Fondamentali:** Tutta la materia che conosciamo, inclusi noi, è composta da sole tre particelle elementari [10:36]:
    - L'**Elettrone**
    - Il **Quark Up**
    - Il **Quark Down**
- **Particelle Pesanti:** Dalle collisioni ad alta energia negli acceleratori (come al CERN) si creano altre particelle più pesanti, come il **Muone** o il **Quark Top** [13:42]. Queste particelle hanno una vita estremamente breve, decadendo in miliardesimi di secondo [17:15].
- **Confinamento dei Quark:** Una caratteristica notevole è che i **Quark non possono esistere da soli**; sono sempre legati fra loro a formare particelle più complesse come il **Protone** (due Quark Up e un Quark Down) e il **Neutrone** [20:09].

2. La Palla: I Bosoni (Forze)

I **Bosoni** sono le particelle che **trasmettono le forze** tra i fermioni, agendo come una "palla da rugby" scambiata tra i giocatori [22:29].

- **Forza Elettromagnetica:** Mediata dal **Fotone** (la particella senza massa) [26:56]. Ad esempio, la repulsione tra due elettroni avviene tramite lo scambio di un fotone [34:25].
- **Forza Nucleare Forte:** Mediata dal **Gluone** (dal verbo inglese *to glue* - incollare). Questa forza tiene uniti i quark all'interno dei protoni e neutroni, e lega protoni e neutroni nel nucleo [27:09]-[27:45].
- **Forza Nucleare Debole:** Mediata dai **Bosoni W e Z**, responsabili dei fenomeni di decadimento radioattivo [28:01].

La Particella di Dio: Il Bosone di Higgs

- **Il Campo di Higgs:** Questo campo scalare si è cristallizzato nello spazio pochi istanti dopo il Big Bang [28:52].
- **Assegnazione della Massa:** L'interazione delle particelle con il **Campo di Higgs** determina la loro massa [30:06]. Le particelle che interagiscono poco (come il fotone) hanno massa zero, mentre quelle che interagiscono molto (come il Quark Top) sono molto più pesanti.
- **Scoperta:** Il **Bosone di Higgs** (la vibrazione del campo) è stato scoperto al CERN nel 2012, quasi 50 anni dopo la sua teorizzazione [29:36].

I Diagrammi di Feynman

Il fisico Richard **Feynman** ha introdotto un modo creativo per visualizzare le interazioni tra particelle (Fermioni e Bosoni) nello spazio-tempo [32:08].

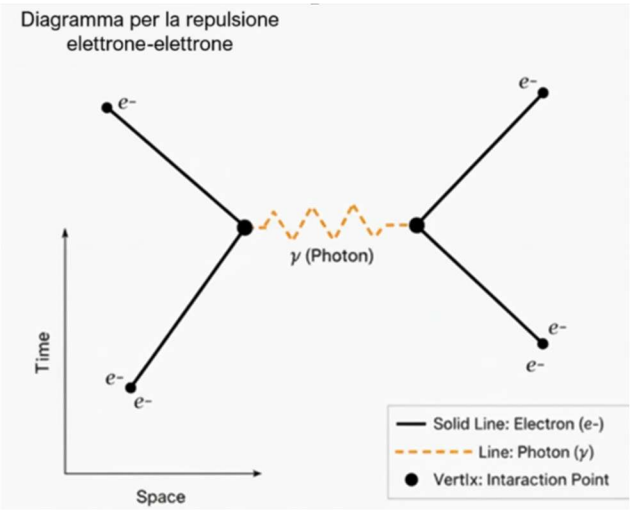


Diagramma Cortesia Gemini

- **Rappresentazione:** I **Fermioni** sono rappresentati da **linee continue** (con una direzione temporale), mentre i **Bosoni** sono rappresentati da **linee ondulate** [32:19].
- **Esempi:** Questi diagrammi possono spiegare interazioni semplici, come la repulsione tra due elettroni che si scambiano un fotone [34:25], o eventi complessi, come l'annichilazione di **materia e antimateria** (dove, concettualmente, una particella di antimateria è vista come una particella di materia che viaggia indietro nel tempo) [36:18].

Ecco come potremmo implementare l'idea.

I Diagrammi di Feynman e il Campo da Gioco

Richard Feynman ha creato i suoi diagrammi per visualizzare le interazioni tra particelle (materia e forze) nello spazio-tempo. Possiamo usare questa struttura per mappare schematicamente le interazioni nel rugby.

Concetto del Diagramma di Feynman	**Analogia nel Rugby**	**Spiegazione Fisica/Rugbistica**
Fermioni (Linee continue)	**I Giocatori**	Rappresentano la **materia** e la **massa** del sistema. Sono le entità che portano la quantità di moto e l'energia.
Bosoni (Linee ondulate)	**Il Pallone / Il Contatto**	Rappresentano le **forze** (mediatori di interazione). Il pallone (*Bosone*) è lo strumento attraverso cui i *Fermioni* (giocatori) si scambiano energia e impulso. Il placcaggio è uno scambio di *Bosoni* di forza.
Vertice di Interazione	**Il Placcaggio / Il Passaggio**	Il punto (evento) nello spazio-tempo in cui l'interazione avviene. Un giocatore passa la palla (emette un *Bosone*) o placcano (interagiscono con la forza).
Annichilazione (Materia/Antimateria)	**Il Rischio Strategico**	(Concetto astratto ma potente) La collisione tra un giocatore molto veloce e uno molto statico che si annullano a vicenda a terra (creano una *ruck*) può essere vista come l'annullamento della loro quantità di moto.

Quando usiamo i termini **Fermioni** (Materia) e **Bosoni** (Forze) in questo contesto, stiamo facendo un'**analogia concettuale** e **non una corrispondenza diretta e numerica** con i Bosoni reali (Fotoni, Gluoni, Bosoni W e Z, e il Bosone di Higgs) del Modello Standard.

Nell'analogia del rugby, ci sono **due tipi principali di interazione/forza (Bosoni)** che mediano il gioco:

I 2 "Bosoni del Rugby" nell'Analogia

1. Il Pallone (Bosone di Scambio di Impulso e Informazione)

- **Concetto:** Il pallone è il mediatore di forza più ovvio. Ogni volta che un giocatore **passa** la palla, sta scambiando un "bosone" (la palla stessa) con un altro giocatore. Questo scambio trasferisce non solo la palla, ma anche:
  - **Impulso (Quantità di Moto):** La velocità del passaggio.
  - **Informazione Tattica:** La decisione su dove attaccare.
- **Corrispondenza concettuale con Feynman:** Se tracciassimo un Diagramma di Feynman per un passaggio, il pallone sarebbe la **linea ondulata** che viaggia tra i due giocatori (linee continue).

2. Il Contatto Fisico (Bosone di Scambio di Forza Nucleare Forte/Debole)

- **Concetto:** Il placcaggio (*tackle*), la mischia (*scrum*) o la *ruck* rappresentano un'interazione mediata da un **Bosone di Forza** che non è il pallone. Questa interazione è la **collisione diretta** tra i corpi dei giocatori.
- **La Forza di Contatto:** Questa analogia può essere vista come la rappresentazione della **Forza Nucleare Forte/Debole** (o, più semplicemente, le forze newtoniane di contatto e di attrito) che vengono scambiate. Quando un giocatore ne placcano un altro, scambiano una grande quantità di energia e impulso attraverso le forze di contatto.
- **Corrispondenza concettuale con Feynman:** In un Diagramma di Feynman di un placcaggio, le due linee continue (i due giocatori) si avvicinano, e l'interazione avviene scambiando un "bosone" (la forza di contatto) prima che si separino o continuino a spingere.

Schema Analogico: Diagramma di Feynman per il Passaggio di Palla

Si può rappresentare il momento in cui il Giocatore A (passatore) interagisce con il Giocatore B (ricevente) scambiandosi il mediatore di forza (la palla).

Simbologia di Feynman	**Analogo nel Rugby**	**Descrizione Fisica**
Linea Continua	**Giocatore (Fermione)**	Rappresenta l'oggetto con massa (materia) che esiste nel tempo.
Linea Ondulata	**Pallone (Bosone)**	Rappresenta il mediatore di forza e informazione (il Bosone di scambio).
Vertice	**Punto di Scambio/Contatto**	L'evento nello spazio-tempo in cui l'interazione ha luogo (rilascio o ricezione).
Asse X	**Spazio (Posizione sul Campo)**	L'avanzamento laterale sul campo.
Asse Y	**Tempo (Durata del Passaggio)**	La durata del passaggio dall'inizio alla fine.

Conclusione: L'Analogia è Funzionale, Non Letterale

Quindi, non ci sono un numero finito e discreto di Bosoni come nel Modello Standard (che ne ha 5), ma l'analogia è strutturata su **due categorie fondamentali di interazione** che mediano il gioco:

1. **Interazione mediata dalla palla** (scambio di oggetto).
2. **Interazione mediata dalla forza** (scambio di contatto/collisione).

L'uso dei **Diagrammi di Feynman** serve a dare una rappresentazione visiva e concettuale di come gli "oggetti" del rugby (giocatori = Fermioni) si influenzano a vicenda attraverso i "mediatori di forza" (pallone/contatto = Bosoni). Pertanto, lanalogia fornisce una concettuale, collegando la meccanica delle collisioni sul campo direttamente alla lingua della fisica delle alte energie.

Oltre il Modello: La Teoria delle Stringhe (L'Orchestra)

La lezione si conclude introducendo la **Teoria delle Stringhe** come un'ipotesi più creativa e profonda [40:00].

- **Le Stringhe:** Questa teoria ipotizza che ogni particella elementare sia, in realtà, composta da minuscoli **filamenti vibranti**, chiamati **Stringhe** [40:13].
- **L'Orchestra Cosmica:** Il **modo in cui queste stringhe vibrano** (la "sinfonia") ne determina la natura, la massa e le caratteristiche: ogni differente modo di vibrare delle stringhe genera una diversa particella (elettrone, fotone, ecc.) [42:28]. In questa visione, l'universo è come una **grande orchestra** che suona [38:52].

Concludendo, il nostro lavoro sottolinea la duplice valenza dell'analisi fisico-sportiva: la sua utilità didattica e il suo impatto sulla comprensione strategica del gioco.

1. Rivelazione degli Aspetti Non-Intuitivi della Fisica

- **I Principi di Newton Applicati:** L'analisi della mischia dimostra come il **Primo Principio (Inerzia)** spieghi il movimento a velocità costante (meta di mischia), il **Secondo Principio** spieghi l'accelerazione risultante da un leggero disequilibrio di forza (la spinta di un solo giocatore), e il **Terzo Principio (Azione e Reazione)** spieghi l'importanza cruciale di **ancorarsi saldamente al terreno** per sfruttare la massa enorme della Terra e resistere alla spinta avversaria.
- **La Dinamica del Pallone:** Il lavoro ha quantificato gli effetti di fenomeni come la **Legge dei Gas Ideali** sulla pressione del pallone (un calo del 10% a basse temperature) e l'importanza della **tenacia giroscopica** (conservazione del momento angolare) e dell'**Effetto Magnus** per garantire che il pallone ovale mantenga una traiettoria stabile e raggiunga distanze maggiori.

2. Il Rugby come Modello per Sistemi Complessi

- **Sistemi Interconnessi:** Il rugby si configura come un eccellente esempio di **Sistema Complesso**, in cui la **rete di feedback** tra i quindici giocatori costringe la squadra a un costante processo di **auto-organizzazione e adattamento**. Questa resilienza, in cui la squadra "non muore" se un componente fallisce, offre parallelismi con i modelli matematici di sistemi in natura.
- **Analogia con la Fisica delle Particelle:** L'analogia con la **Fisica delle Particelle** è particolarmente illuminante: i **Fermioni (massa/materia)** sono i giocatori, i **Bosoni (forze)** sono la "palla da rugby" scambiata, e il **Campo di Higgs** determina la "massa" delle particelle attraverso l'interazione. La **Teoria delle Stringhe**, che descrive le particelle come filamenti vibranti, viene elegantemente paragonata a una **grande orchestra**.

Conclusioni

Questo lavoro ha dimostrato come il gioco del rugby sia un eccellente laboratorio per l'applicazione e l'esplorazione di un ampio spettro di principi fisici. Dal punto di vista della **meccanica newtoniana**, le mischie e i placcaggi sono regolate da una complessa interazione di **forza, massa e attrito**; l'accelerazione calcolata nella mischia (circa $g/16$) ne attesta la natura controllata, ben lontana dalla

percezione di caos. L'analisi del volo del pallone, con la sua forma aerodinamicamente instabile, ha messo in luce l'importanza della **rotazione giroscopica** e dell'**Effetto Magnus** per superare il disordine intrinseco, mentre l'uso del **moto relativo** chiarisce la legalità fisica del passaggio all'indietro. Tuttavia, il contributo più significativo di questa analisi risiede nell'aver inquadrato il rugby in termini di **Fisica Teorica**. Identificare i giocatori come **Fermioni** e le interazioni (palla e contatto) come **Bosoni** ci ha permesso di utilizzare l'architettura concettuale dei **Diagrammi di Feynman** per mappare le dinamiche di gioco, fornendo uno strumento potente per la visualizzazione delle strategie. In definitiva, il rugby si configura come un **sistema adattivo complesso** i cui principi di base (avanzamento, sostegno, continuità) sono espressioni emergenti di leggi fisiche fondamentali. Questo studio conferma che la fisica non solo spiega *come* il gioco funziona, ma offre un linguaggio universale per descrivere l'armonia tra i suoi elementi, unendo la violenza del contatto alla precisione del calcolo. Il campo da rugby è, di fatto, un modello in scala della dinamica e dell'interazione che governano l'universo.

Appendice - Glossario del Rugby (Rugby Union)

Giocatori e Ruoli

Ruolo (Numero)	Nome Italiano	Funzione Principale
1 & 3	Pilone (Prop)	Forniscono supporto e potenza nella mischia; il n°3 è il pilone destro (tighthead) e il n°1 è il sinistro (loosehead).
2	Tallonatore (Hooker)	In mischia, "tallona" (calcia) la palla all'indietro. Lancia la palla nella *rimessa laterale* (*touche*).
4 & 5	Seconda Linea (Lock)	Il motore della mischia. Saltano nelle *touches* per ricevere i lanci.
6 & 7	Terza Linea Ala (Flanker)	I "guerrieri" del campo. Forniscono velocità, placcaggio e competono per la palla nei *rucks*.
8	Terza Linea Centro (No. 8)	Giocatore chiave nella mischia. Dirige la spinta e può raccogliere la palla per attaccare.
9	Mediano di Mischia (Scrum-half)	Il "cervello tattico" tra gli avanti. Introduce la palla nella mischia e la distribuisce dopo le fasi di mischia o *ruck*.
10	Mediano d'Apertura (Fly-half)	Il principale regista del gioco. Decide se calciare, passare o attaccare.
11 & 14	Ala (Wing)	Giocatori veloci, il cui compito principale è finalizzare le mete e coprire la difesa.
12 & 13	Centri (Center)	Costruiscono l'attacco, creano spazi e portano avanti la linea di difesa.
15	Estremo (Fullback)	Ultimo baluardo della difesa. Riceve i calci alti e rilancia l'attacco.

Fasi Statiche e Contest
Mischia Ordinata (*Scrum*)

La mischia è una fase statica e codificata per far ripartire il gioco dopo un'infrazione minore (come l'**In Avanti**). Come hai analizzato nel tuo documento, è il luogo dove si applicano in modo cruciale i **Principi di Newton**.

- **Scrum:** La formazione di otto giocatori per squadra che si legano e spingono l'uno contro l'altro.
- **Tallonare:** L'azione del Tallonatore (n°2) di calciare la palla introdotta nel tunnel della mischia per portarla sotto il proprio pacchetto di avanti.
- **Pilone Destro (*Tighthead*, n°3):** Il pilone più forte che deve contrastare due avversari (il pilone sinistro e il tallonatore avversari).

Rimessa Laterale (*Touche* / *Lineout*)

La rimessa laterale serve a riprendere il gioco dopo che la palla è uscita dal campo lateralmente.

- **Touche:** La rimessa laterale vera e propria.
- **Liftare:** L'azione dei giocatori di sollevare il proprio compagno di squadra (di solito una seconda linea) per fargli ricevere la palla lanciata dal Tallonatore.

Fasi Dinamiche e Contatto

- **Ruck:** Fase di gioco che si crea quando uno o più giocatori di ciascuna squadra, in piedi, sono a contatto e sovrastano la palla a terra. L'obiettivo è proteggere o contendere la palla.
- **Maul:** Fase di gioco che si crea quando il portatore di palla viene sostenuto da uno o più compagni, ed è contemporaneamente trattenuto da uno o più avversari. I giocatori sono tutti in piedi e non sono a terra. Spesso è usato per avanzare verso la meta.
- **Placcaggio (*Tackle*):** L'atto di afferrare e portare a terra un avversario che porta la palla. Il placcato deve rilasciare immediatamente la palla.

Infrazioni e Regolamento

- **In Avanti (*Knock-on*):** L'infrazione più distintiva. Si verifica quando un giocatore perde il controllo della palla, la quale cade in avanti o viene colpita in avanti con le mani o le braccia, finendo davanti al giocatore stesso. Il gioco riprende con una mischia per la squadra avversaria.
- **Passaggio in Avanti:** Un passaggio con le mani in cui la palla si muove in avanti, verso la linea di meta avversaria. È vietato e riprende con una mischia per l'avversario. Tuttavia, come analizzato nel tuo documento, a causa del **moto relativo** del giocatore che corre, è possibile che un passaggio lanciato all'indietro (rispetto al corpo) in realtà avanzi rispetto al terreno (da qui il "paradosso").
- **Fuorigioco (*Offside*):** Un giocatore è in fuorigioco quando si trova davanti a un compagno che porta la palla, o che ha calciato la palla, o dietro una linea di fuori gioco stabilita per una fase statica (*ruck*, *maul* o mischia).
- **Vantaggio:** Il concetto per cui l'arbitro decide di non interrompere il gioco immediatamente dopo un'infrazione minore, permettendo al gioco di continuare se la squadra non colpevole ha la possibilità di trarne un beneficio strategico.

Punteggio e Campo

- **Meta (*Try*):** Il punteggio maggiore (5 punti). Si ottiene schiacciando la palla a terra nell'area di meta avversaria.

- **Trasformazione (*Conversion*):** Un calcio piazzato che viene concesso dopo una meta (2 punti aggiuntivi), eseguito in linea con il punto in cui la meta è stata segnata.
- **Calcio di Punizione (*Penalty Kick*):** Calcio piazzato per un'infrazione grave (3 punti), oppure la squadra può scegliere di calciare in *touche* o chiedere una mischia.
- **Drop Goal:** Un calcio al volo scagliato durante il gioco (non da una punizione) dopo che la palla ha toccato terra (3 punti).

Dato l'approccio scientifico ora adottato, si forniscono alcuni riferimenti che coprano sia la **biomeccanica** delle collisioni e dello *scrum* (la parte più "fisica" in senso stretto) sia l'**aerodinamica** della palla ovale e aspetti più concettuali.

Ecco una bibliografia suddivisa per aree tematiche:

Riferimenti Bibliografici: Fisica e Rugby

I. Libri e Dialoghi (Approccio Concettuale e Quantistico)

Questi testi affrontano il rugby da una prospettiva che va oltre la semplice tattica, toccando la fisica e la filosofia:

1. Klein, É., Iliopoulos, J., & Wilkinson, J. (2013). Rugby quantistico: Un dialogo tra sport e fisica. Add Editore.
    - *(Nota: Questo è il testo fondamentale che mette in dialogo il campione Jonny Wilkinson con due fisici quantistici di fama, esplorando l'imprevedibilità del rimbalzo della palla ovale attraverso la lente della fisica quantistica e della teoria del caos.)*
2. Spiro Zavos. (2007). L'arte del rugby. Giulio Einaudi editore.
    - *(Approccio più narrativo e culturale, ma tocca la complessità e l'imprevedibilità del gioco, concetti che si legano alla teoria dei sistemi complessi.)*
3. Malvaso, F. (2022). Filosofia del rugby.
    - *(Testo che usa il rugby come metafora per concetti etici e filosofici, utile per l'analisi dei sistemi complessi e del comportamento di squadra.)*

II. Biomeccanica

Questi riferimenti sono utili per quantificare i principi di Newton nello *scrum* e nei *tackle*:

4. Preatoni, E., Stokes, K., England, M., & Trewartha, G. (2012). Forces generated in rugby union machine scrummaging at various playing levels. Women, 7771, 197-297.
5. Preatoni, E., Wallbaum, A., Gathercole, N., Coombes, S., Stokes, K. A., & Trewartha, G. (2012). An integrated measurement system for analysing impact biomechanics in the rugby scrum. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology, 226(3-4), 266-273.
6. Preatoni, E., Stokes, K. A., England, M. E., & Trewartha, G. (2015). Engagement techniques and playing level impact the biomechanical demands on rugby forwards during machine-based scrummaging. British journal of sports medicine, 49(8), 520-528.
7. Cazzola, D., Stone, B., Holsgrove, T. P., Trewartha, G., & Preatoni, E. (2016). Spinal muscle activity in simulated rugby union scrummaging is affected by different engagement conditions. Scandinavian journal of medicine & science in sports, 26(4), 432-440.

Ringraziamenti (Acknowledgments)

Gli autori (Mauro Giorcelli e Amelia Carolina Sparavigna) ringraziano i Prof. Enea Montoli, Francesco Gonella, Elti Cattaruzza, Vincenzo Schettini, per l'utilissimo materiale, sviluppato e messo a disposizione sul web.

Mauro Giorcelli e Amelia Carolina Sparavigna, in virtù della loro formazione come **Fisici** e non in qualità di **Tecnici del Rugby**, riconoscono che l'analisi presentata si concentra sui principi fondamentali della meccanica e della dinamica, privilegiando la teoria alla prassi del gioco.

Per la strutturazione e l'articolazione di alcuni aspetti più specifici e tecnici del Rugby, gli autori si sono avvalsi della collaborazione del **Modello Linguistico Gemini (Google)**, che viene sentitamente ringraziato per il supporto nell'organizzazione concettuale del materiale.

Al fine di migliorare l'accuratezza tecnica e la rilevanza pratica della discussione, gli autori restano in ogni caso **aperti e disponibili a ricevere suggerimenti, correzioni e contributi diretti dagli esperti del settore** e dai professionisti del *coaching* rugbistico.