

Внешняя баллистика в XVI-XVII вв.

Часть I.

Задача о полете снаряда в практической механике XVI в.

Е.А. Зайцев

Семинар по истории математики и механики

МГУ, мехмат

14.12.2020

1. Введение.

Задача о полете брошенного тела

Значение открытия параболической траектории полета снаряда для становления классической механики

Доказательство параболичности траектории полета, полученное в пер. пол. XVII в., явилось первым примером адекватного применения математики в динамике. В предшествующую эпоху использование математики в механике ограничивалось областью статики, в которой движение отсутствует, и кинематики, в которой силы движения не рассматриваются (астрономия).

В доказательстве параболичности траектории полета, найденном в пер. пол. XVII в., использовался ряд новаторских положений, чуждых предшествующей традиции. Эти положения были затем обобщены И. Ньютоном и легли в основу созданной им классической механики.

Вот эти положения:

- закон прямолинейной инерции;
- закон квадратичной зависимости пути от времени при падении тел под действием тяжести (предшественник второго закона Ньютона);
- закон параллелограмма сил и движений, в соответствии с которым сложные силы и вызываемые ими движения могут быть представлены в виде векторной суммы *независимых* компонент.

История вопроса

Задача о брошенном теле возникла еще в античности, но вплоть до XVI в. вопрос о форме траектории полета в ней не обсуждался. Основным в доклассической механике был вопрос о причине движения после утраты движущимся телом контакта с исходным «двигателем» – рукой, бросающей камень, или тетивой лука, из которого выпускается стрела. Два варианта ответа: среда (воздух), в которой происходит полет, или переданная телу сила (импетус).

Вопрос о форме траектории полета возник только в XVI в. в связи с использованием в артиллерии мортир и гаубиц, ведущих навесную стрельбу при больших углах возвышения. Это вопрос имел важное практическое значение. Знание геометрической формы траектории могло быть использовано для оценки дальности и высоты полета снарядов при произвольном угле возвышения на основе данных пробных стрельб.

Впервые вопрос о форме траектории был рассмотрен Н. Тартальей (1537); но свое окончательное решение он получил лишь спустя столетие в работе Э. Торричелли (1644). Тезис о параболичности при произвольном угле возвышения был сформулирован Б. Кавальери (1632) и Галилеем (1638); но доказали они его только для случая горизонтальной стрельбы.

Динамика полета снаряда в доклассической механике

В доклассической механике полет снаряда определялся совместным действием двух сил – импетуса, вложенного в снаряд взрывом пороховой смеси, и тяжести, присущей ему от природы. Силы эти были различны по своей природе. Кроме того они были разнонаправлены. Импетус действовал в направлении линии возвышения орудия, а тяжесть – по вертикали. Движение, вызванное импетусом, было *вынужденным* (*насильственным*), а падение под действием тяжести – *естественным*.

Аристотель указывал на возможность смешанного движения, но соответствующей теории не создал, ограничившись обсуждением основных видов движения – насильственного и естественного.

Отсутствие образца для подражания привело к тому, что XVI в. при анализе *составного движения* авторы XVI в. стали привлекаться теории, развитые в других областях аристотелевской физики. Одной из них была теория «смеси», разработанная Аристотелем для *составных вещей* (в трактате «О рождении и уничтожении»). Теория сложного движения, осуществляющегося под действием импетуса и тяжести, стали выстраивать по аналогии с теорией вещей, состоящих из двух взаимодействующих частей. Обсуждение деталей см. ниже.

Теория смеси. Виды смеси по Аристотелю

1. Соединение, в котором существенно преобладает одна часть; в этом случае смесь наделяется свойствами этой части («капля вина не смешивается с 10 тысячами мер воды, но теряет свою форму и изменяется целиком в воду»).
2. Соединение, в котором противоположные компоненты обладают одинаковой интенсивностью; в этом случае они взаимно уничтожаются (теплое при смешивании с холодным).
3. Механическое соединение; в этом случае части, входящие в состав целого, полностью сохраняют свои свойства (смесь зерен ячменя и пшеницы). Это тот редкий случай смеси, для которого возможна количественная оценка совместного действия частей.
4. Соединение, в котором части «в какой-то мере равны по своей силе». В этом случае «каждая из них изменяет свою природу в направлении преобладающего, но становится не другим предметом, а чем-то средним и общим им обоим».

Общий вывод: части в составе целого (за исключением механического соединения) изменяют свои свойства в зависимости от формы целого (холизм). Поскольку целое не сводимо к механической сумме частей, количественная оценка смеси проблематична.

2. Траектория полета снаряда в доклассической механике

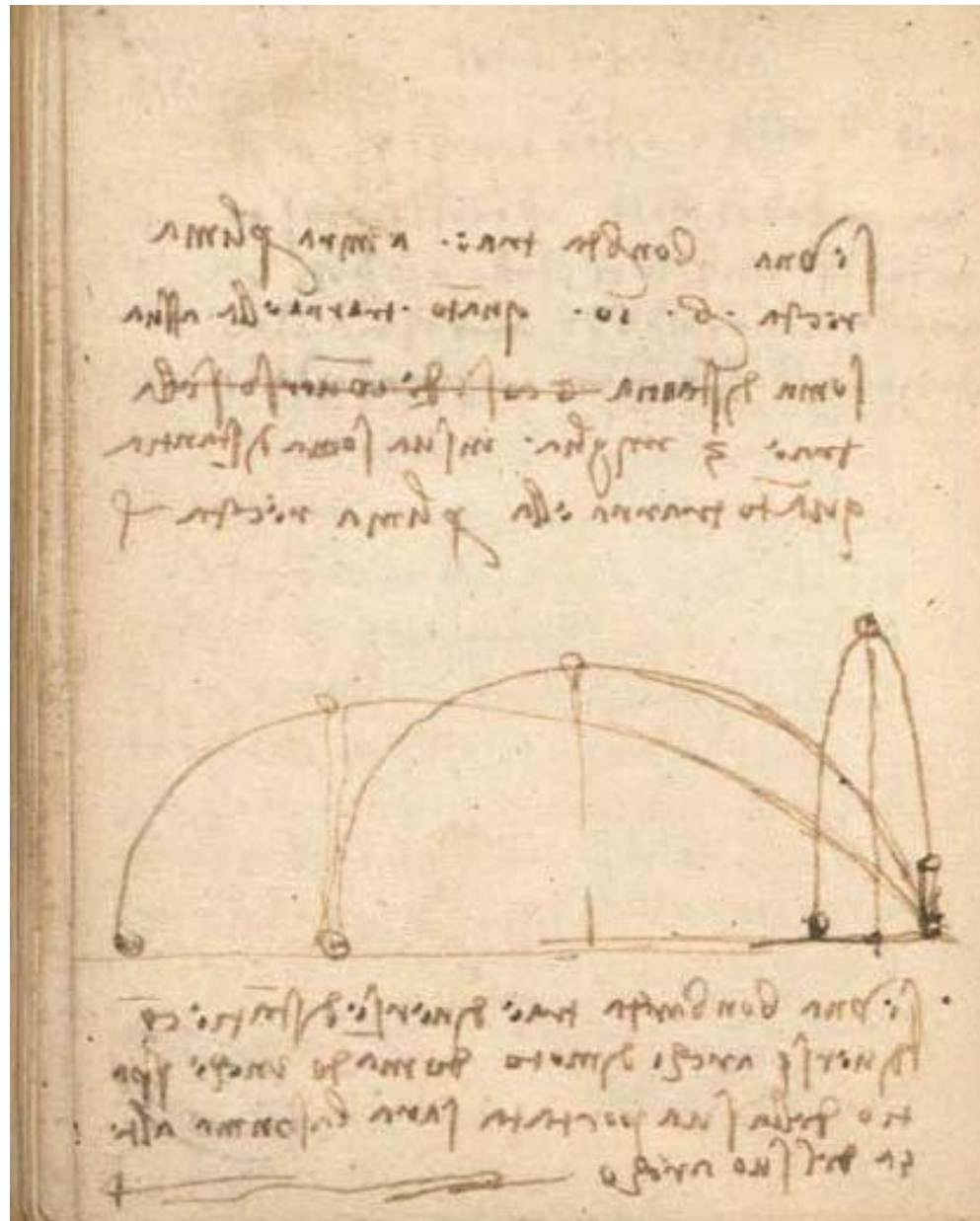
Guido da Siena, Благовещение (1262-1279)
Изображение «траектории» полета голубя (символа Св. Духа)



Konrad Kyeser, Bellefortis (нач. 15 в.). Это еще не траектория...



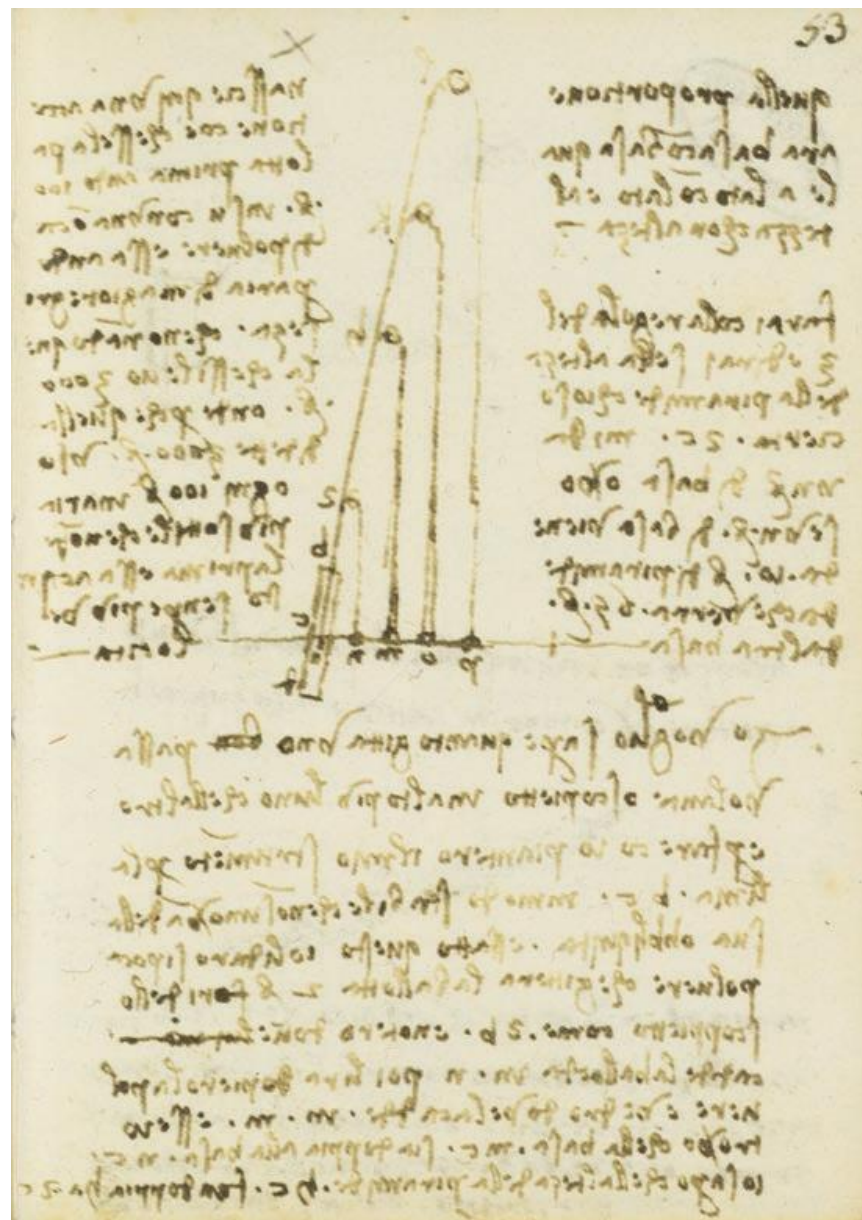
Первое изображение баллистических траекторий Рисунок Леонардо да Винчи (ок. 1500 г.)



**Баллистические траектории
Рисунок Леонардо да Винчи (ок. 1500 г.)**



Баллистические траектории Рисунок Леонардо да Винчи (ок. 1500 г.)



Николо Тарталья, «Новая наука» (1537)

La nova scientia de Nicolo Tartaglia, Firenze, 1537

Траектории полета снаряда
для двух видов стрельбы – «в
упор» из пушки и навесной из
мортиры.

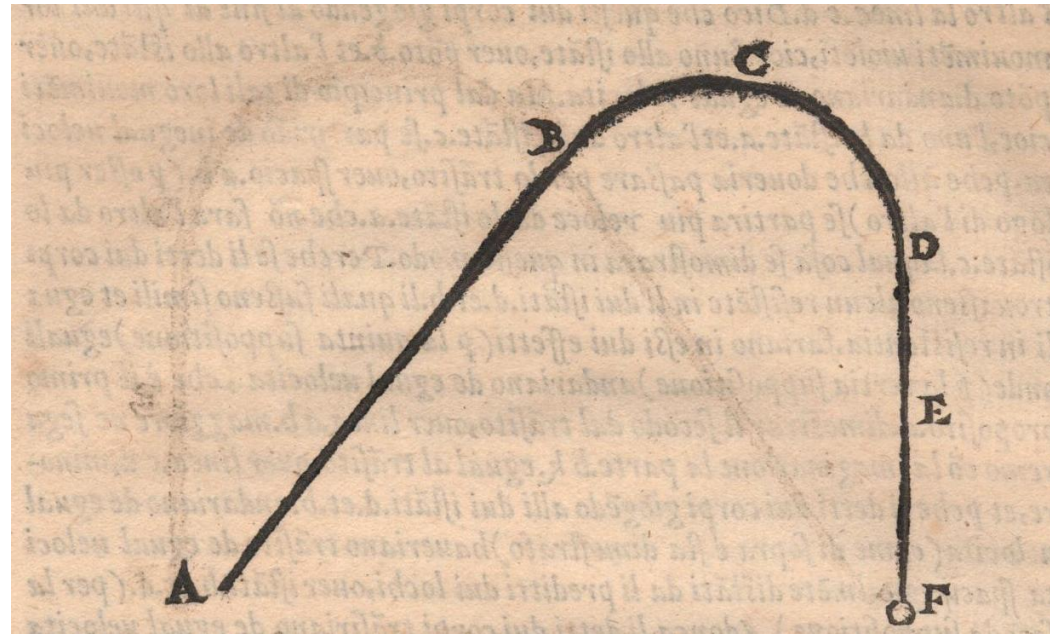
Первое печатное
изображение баллистических
траекторий



Траектория полета снаряда в практической баллистике XVI в.

Образец баллистической траектории. Николо Тарталья «Новая наука», 1537

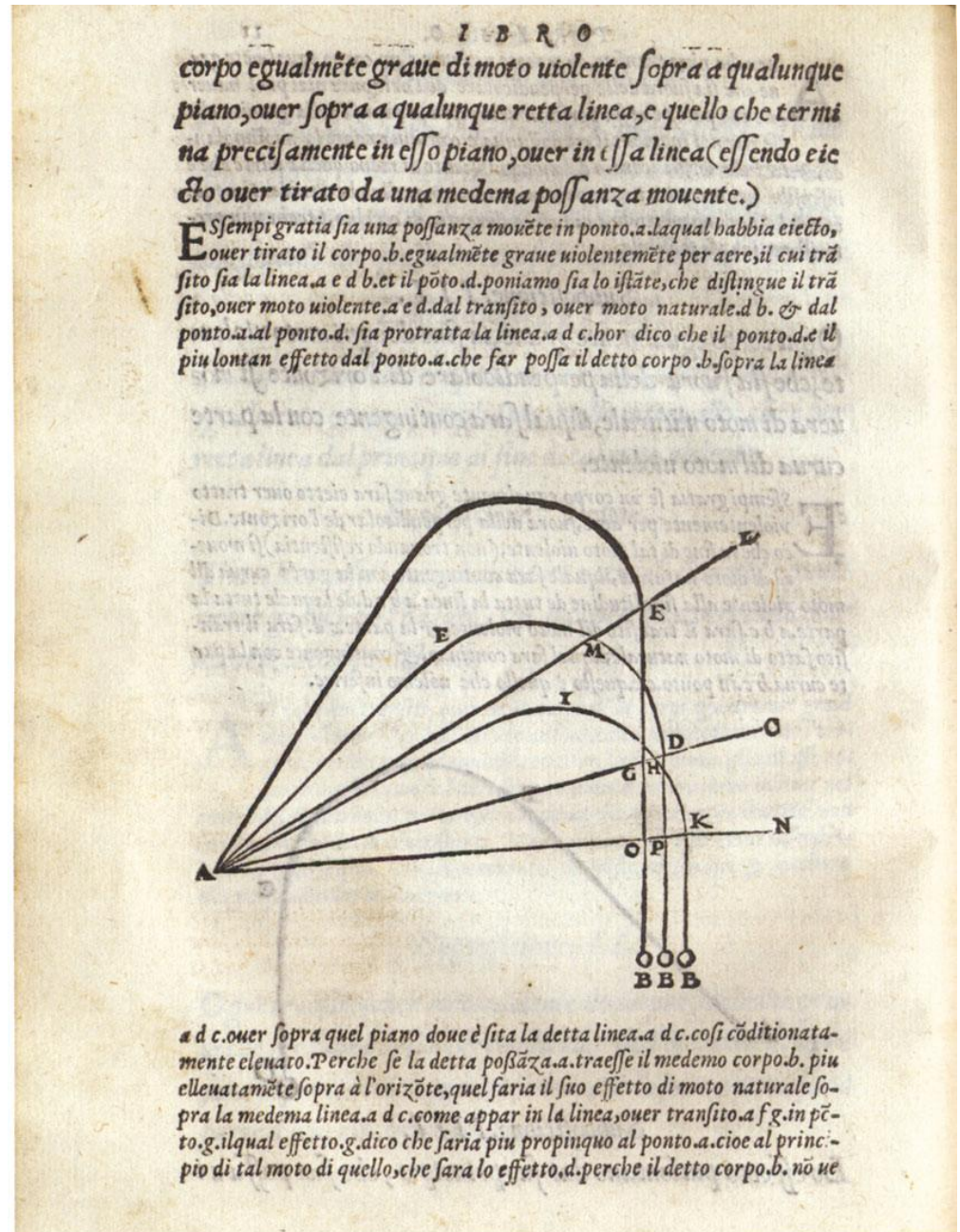
Nicolo Tartaglia,
La nova scientia de Nicolo Tartaglia.
Firenze, 1537



Траектория полета снаряда в практической баллистике XVI в.

Образцы баллистических траекторий. Николо Тарталья «Новая наука», 1537

Niccolo Tartaglia,
La nova scientia de Nicolo Tartaglia.
Firenze, 1537



Николо Тарталья: теория полета снаряда

1. Первое геометрическое описание траектория полета снаряда дал Н. Тарталья (1499-1557). Согласно Тарталье, траектория состоит из трех ветвей:
 - (i) наклонная прямая линия – соответствует *насильственному* движению снаряда под действием силы порохового взрыва;
 - (ii) дуга окружности – второй этап *насильственного* движения,
 - (iii) вертикальная прямая линия – соответствует *естественному* движению снаряда вниз под действием тяжести.
2. Теория Тартальи основывается на восходящем к Аристотелю, различении двух видов движения – *насильственного* и *естественного*. Смешанное движение, по Тарталье, невозможно: «Никакое равномерно плотное тяжелое тело не может двигаться ни в каком интервале времени или пространства движением, смешанным из насильственного и естественного» («Новая наука» Кн. 1, предл. 5).
3. Причина: *насильственное* движение всегда происходит с замедлением, а *естественное* – с ускорением. Одно и то же тело одновременно не может ускоряться и замедляться. Поэтому в каждый момент тело движется либо вынужденным, либо естественным движением.
4. Длина прямолинейного отрезка вынужденного движения увеличивается вместе с увеличением угла возвышения орудия.
5. «Quesiti et invenzioni diverse» (1546). Появление смешанного движения.

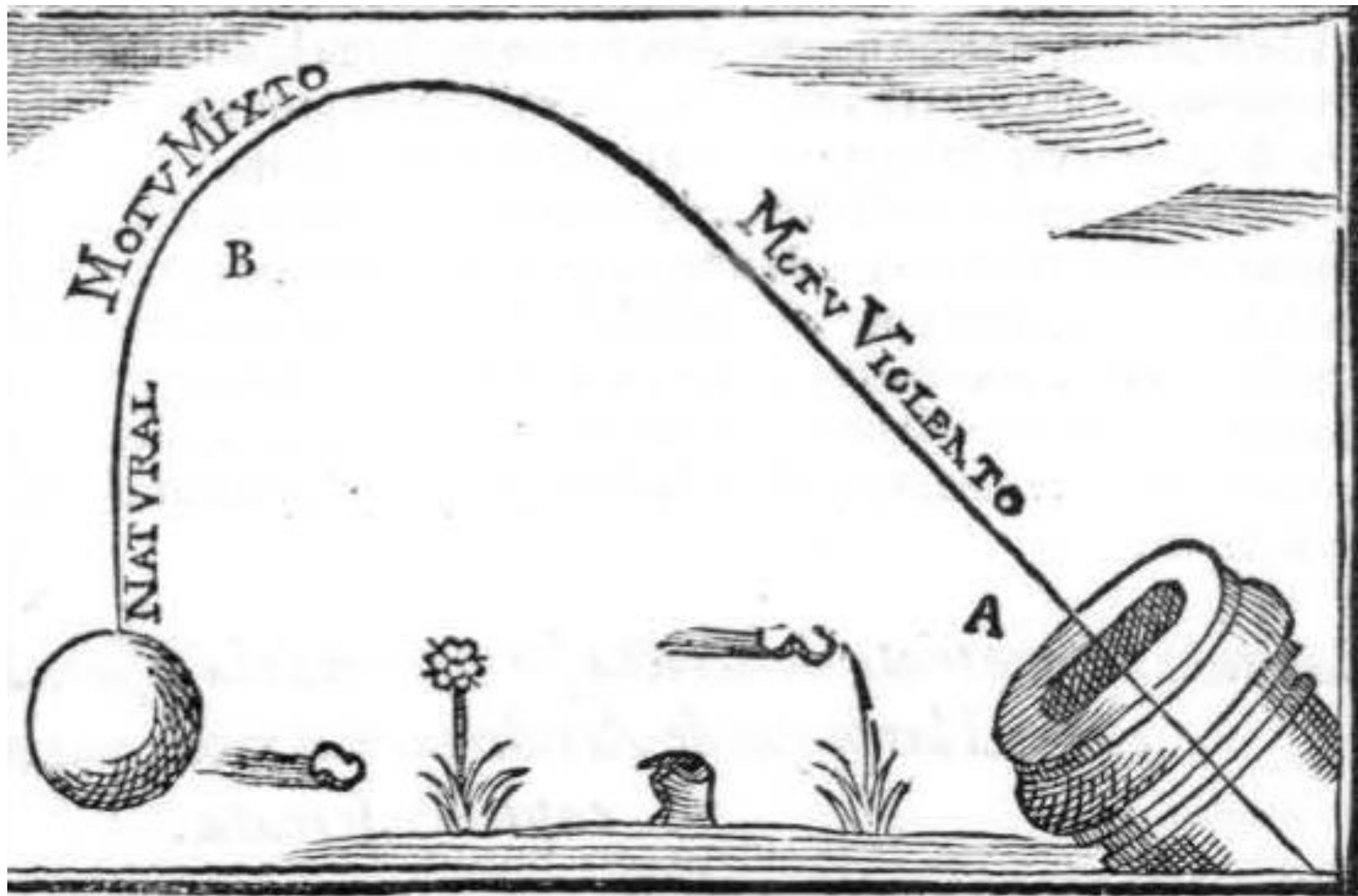
Представление о смешанном движении (под действием нескольких сил) по аналогии с теорией смеси Аристотеля

Теория смешанного движения строится по аналогии с теорией смеси для вещей. Свойства сложного движения выводятся из свойств сложной вещи.

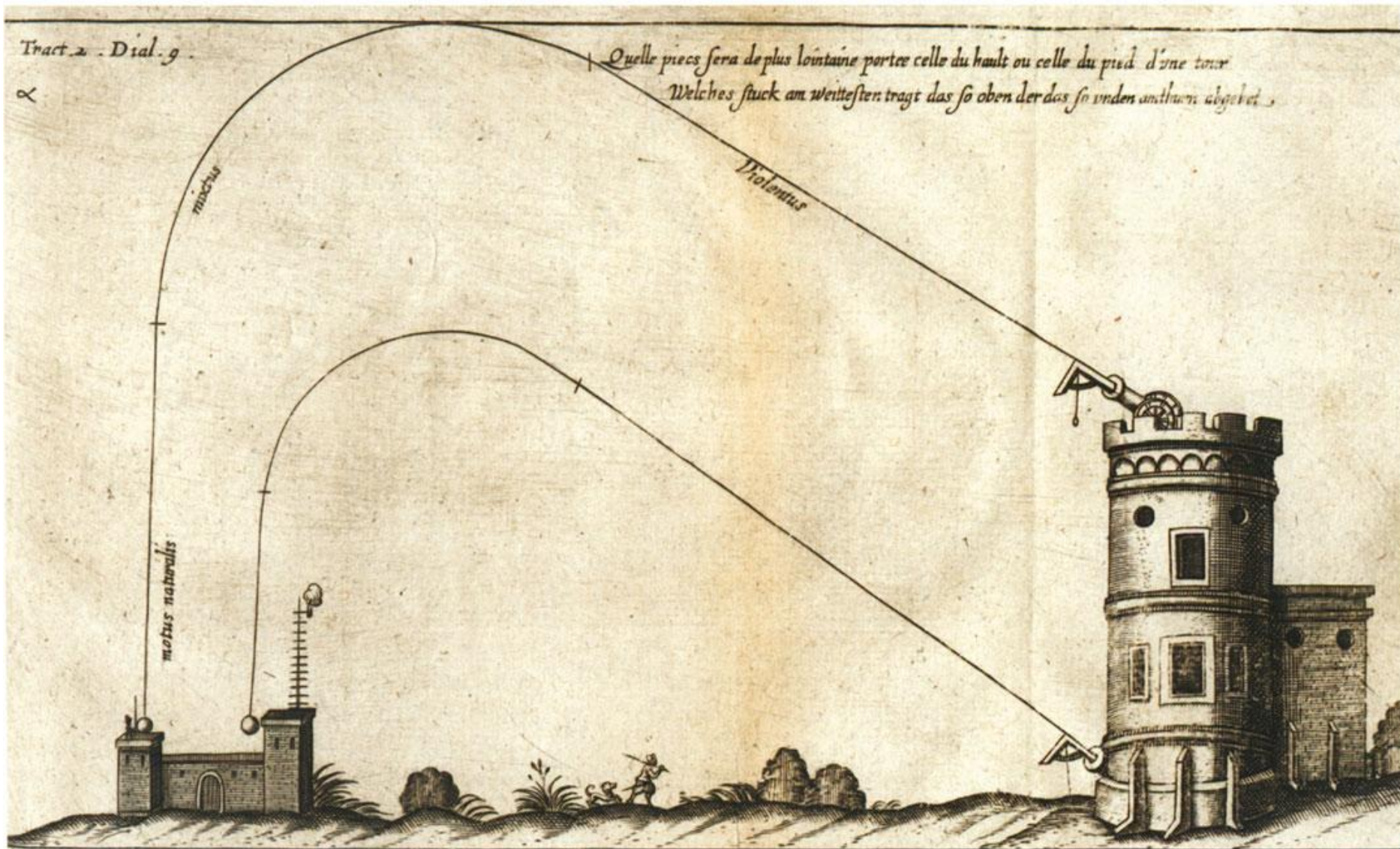
Согласно практическим баллистикам и теоретикам движения XVI в. первая ветвь баллистической траектории – наклонный отрезок прямой – соответствует вынужденному движению под действием импетуса. Смешанное движение на этом отрезке аналогично первому типу смеси: одна из его компонент (импетус) значительно превосходит другую (тяжесть). Поэтому на данном отрезке движение полностью определяется импетусом. Промежуточная ветвь, представленная дугой окружности, соответствует третьему типу смеси, когда примерно равные силы – импетуса и тяжести – борются между собой. Это самый сложный случай, математическое описание которого проблематично. Конечная ветвь траектории возвращает к аналогии с первым видом смеси, только здесь тяжесть полностью побеждает импетус. Ею определяется траектория падения по прямой.

Траектория полета снаряда (по следам Н. Тартальи)

Luys Collado, *Platica manual de artilleria*. Milano, 1592

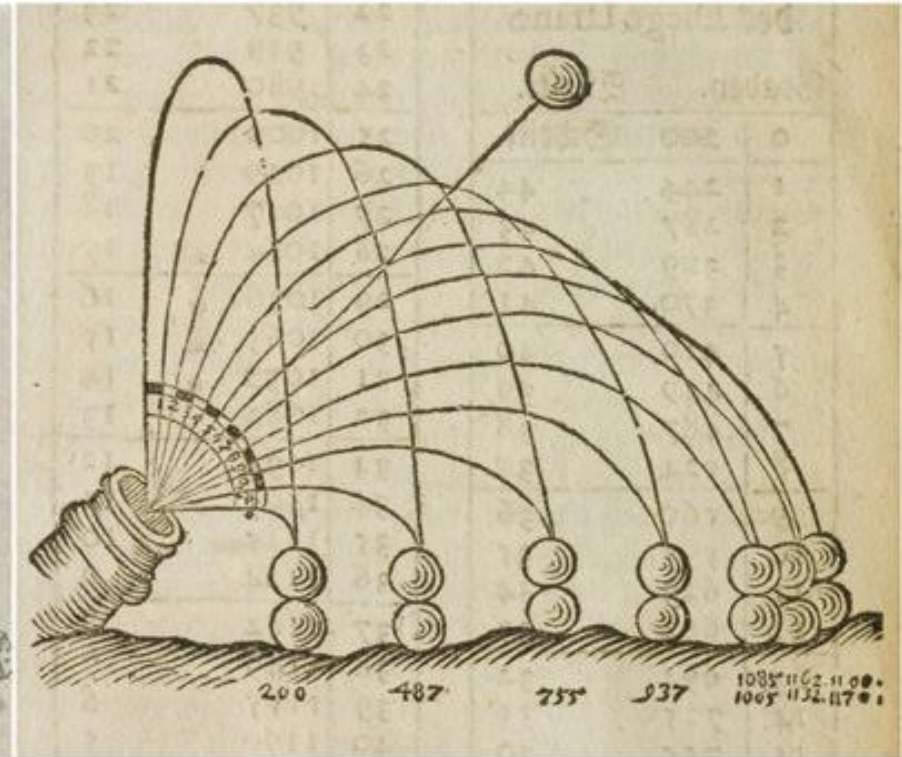
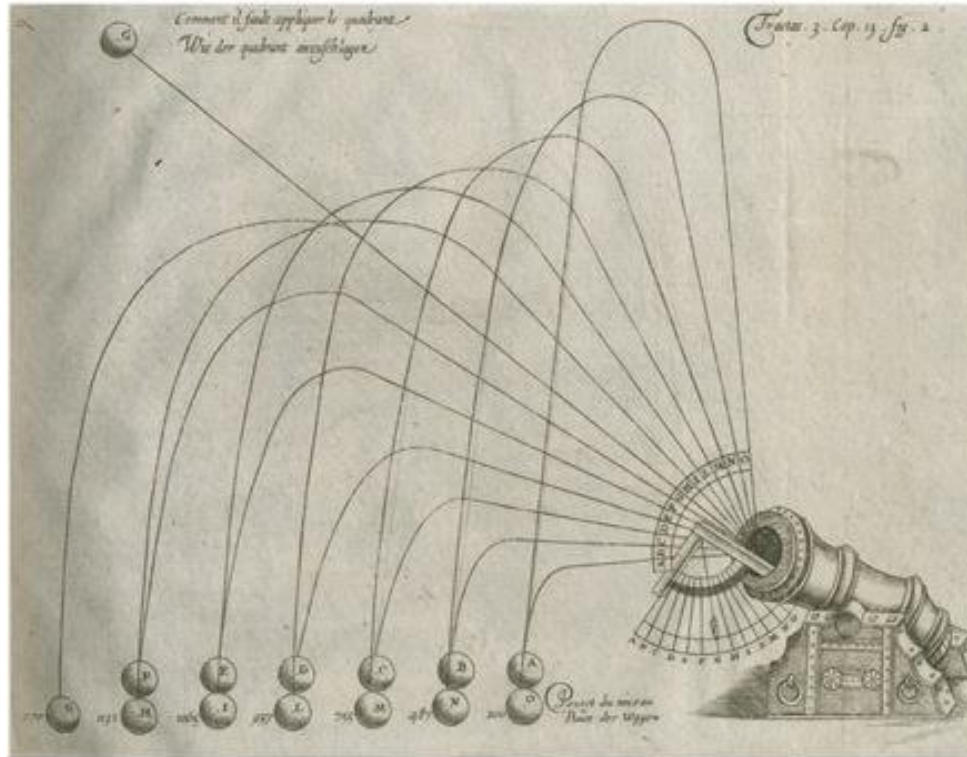


Траектория полета снаряда (по следам Н. Тартальи)
Daniel Ufano, *Artillerie, ou vraye instruction de l'artillerie et de ses appartenances*. Berthelin, 1628.



Траектория полета снаряда (по следам Н. Тартальи)

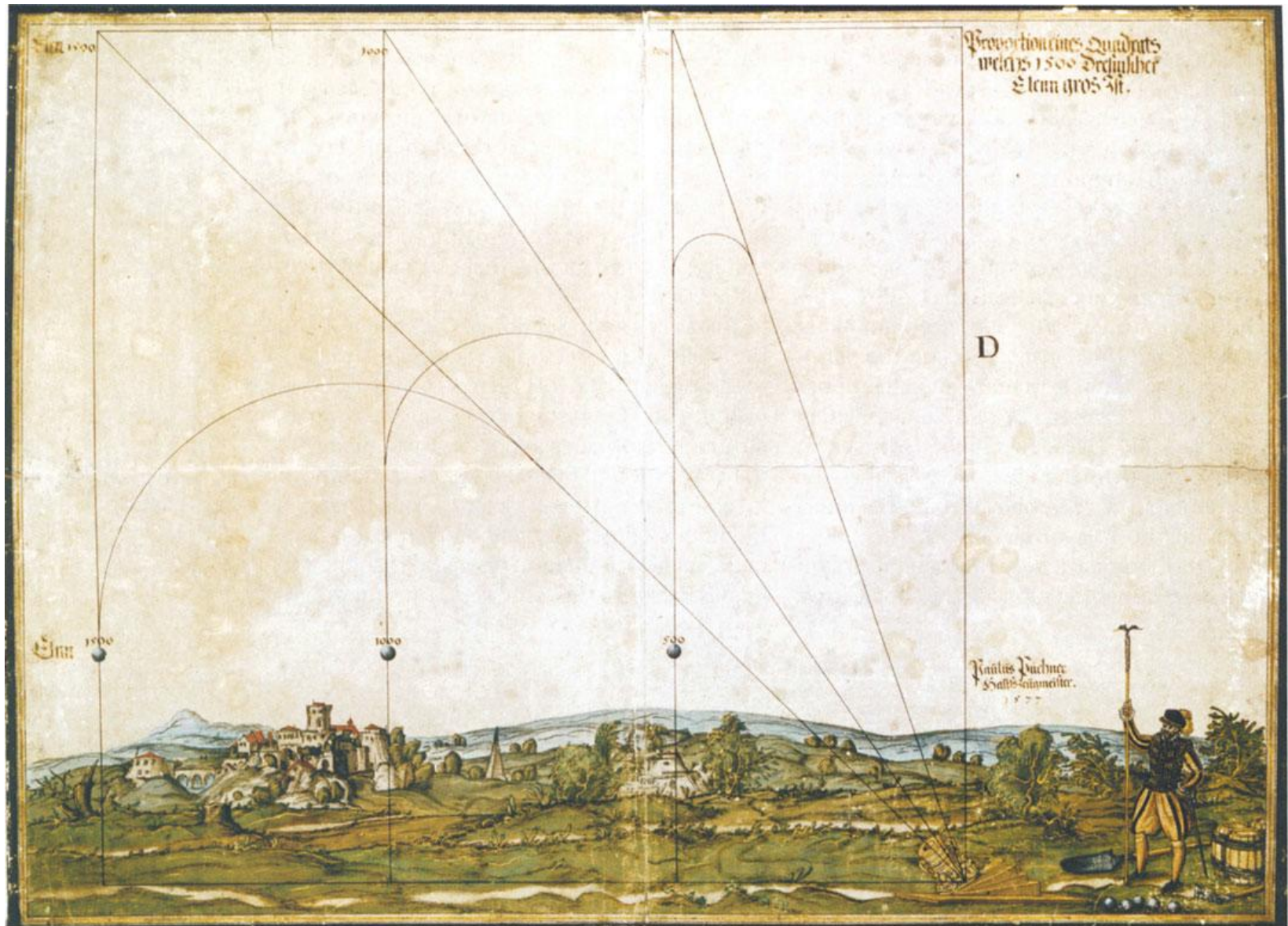
Daniel Ufano, *Artillerie, ou vraye instruction de l'artillerie et de ses appartenances*. Berthelin, 1628.



Траектория полета снаряда (по следам Н. Тартальи)

Paulus Puchner (рисунок второй пол. XVI в.)

Mathematisch-Physikalischer Salon, Staatliche Kunstsammlungen Dresden



Упрощенная версия теории Тартальи (двухчастная траектория)
Daniel Santbech, *Problematum astronomicorum et geometricorum sectiones septem*. Basel, 1561.



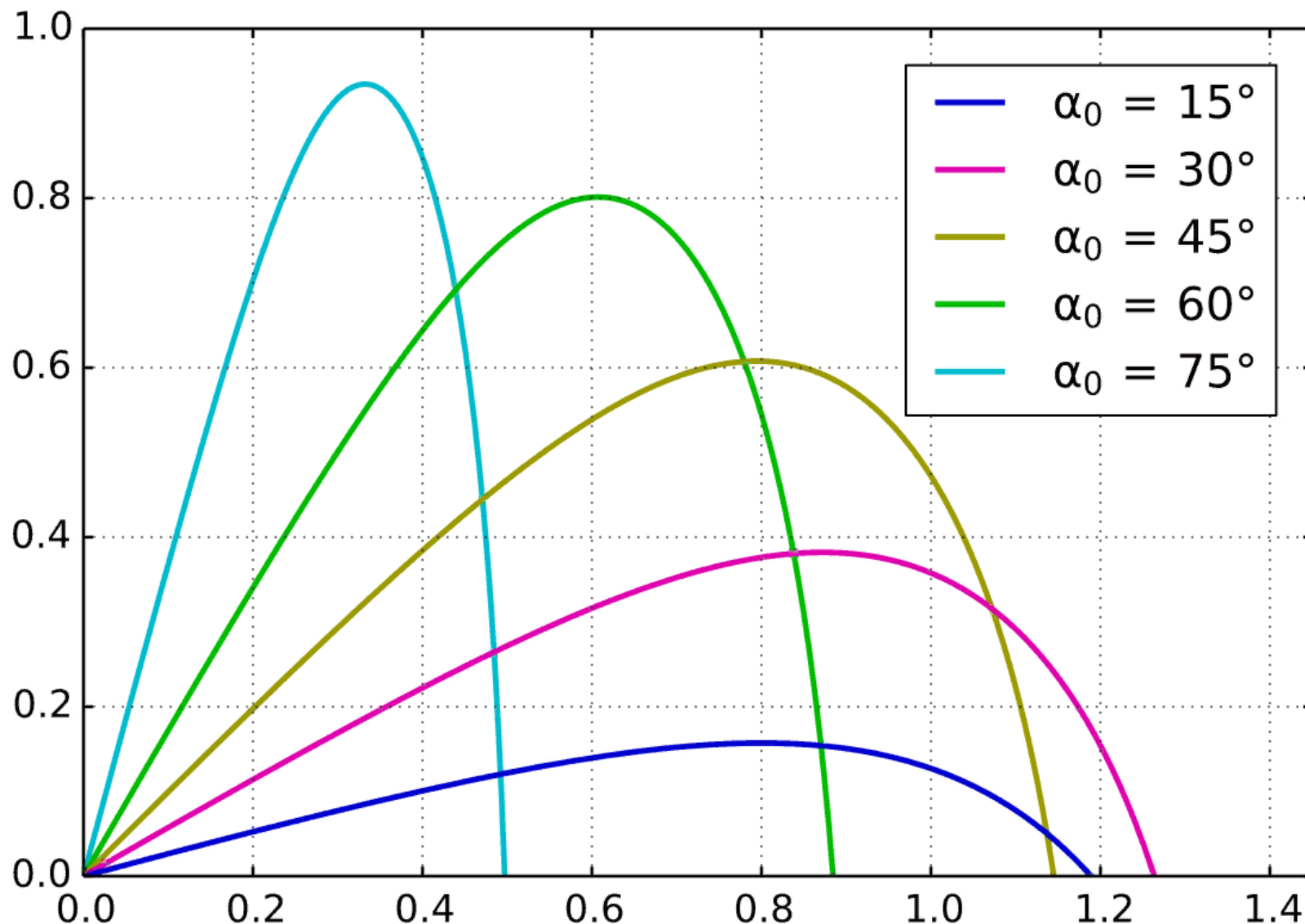
Теория полета снаряда по Д. Сантбеку

1. Траектория состоит из двух частей – наклонной прямой, которая представляет вынужденное движение под действием силы порохового взрыва (импетуса), и вертикальной прямой, по которой происходит *естественное* падение под действием тяжести.
2. Траектория не является гладкой кривой.
3. Сантбек сознательно упростил форму траектории, исходя из практических соображений. Он понимал, что, на деле, ветвь траектории, соответствующая движению под действием импетуса, не может быть прямолинейным отрезком. В конце первой фазы полета она должна искривиться в силу исчерпания импульса.
4. Практическое достоинство модели Сантбека состояло в том, что в ней для нахождения высоты полета и дальности стрельбы было достаточно знания элементарной геометрии.
5. Согласно Сантбеку, длина начального отрезка траектории постоянна и не зависит от угла возвышения. Отсюда следует (неверный) вывод, что максимальная дальность полета снаряда достигается при горизонтальной стрельбе.

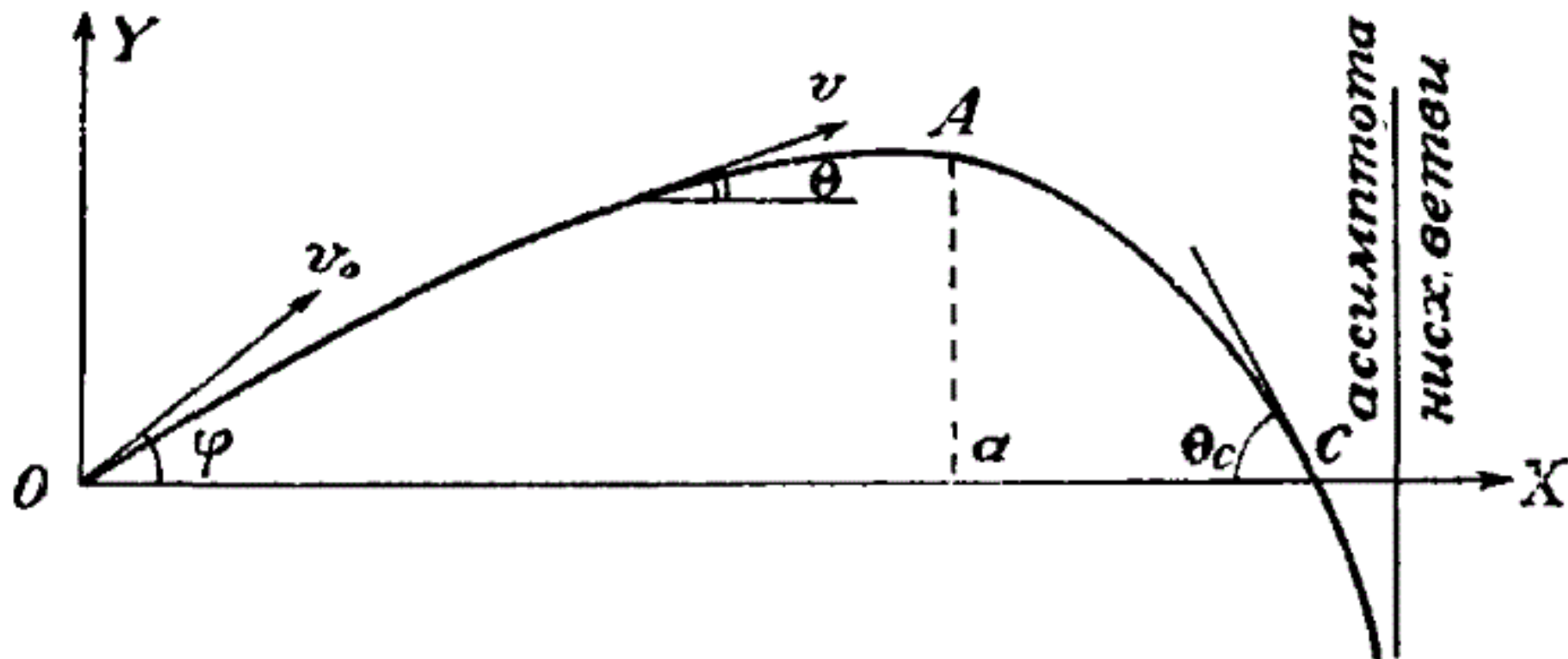
Разные принципы стрельбы: пушки и мортиры (гаубицы)



**Современное представление о баллистической траектории при
различных углах возвышения орудия
(сходство с историческими аналогами XVI в.)**



Траектория полета снаряда согласно современной баллистике — она смещена относительно центра



Фиг. 2. Траектория снаряда в воздухе: OA —восходящая ветвь траектории, AC — нисходящая ветвь траектории, A —вершина траектории.

Траектория полета снаряда в работах теоретиков (XVI в.)

1. *Джироламо Кардано* (1501-1576): «Брошенное тело следует по пути, форма которого определяется тремя видами движений: в начале – *вынужденное* движение, в конце – совершенно *естественное*, в середине – их смешение». «Когда ядро, двигаясь по прямой линии, достигает вершины (пути), оно не сразу возвращается вниз по кругу или прямой линии, но сначала следует по линии, которая очень близка к параболе Заканчивается же движение вертикальным падением, свойственным тяжелой вещи».

2. *Бернардино Бальди* (1553-1617) – переводчик на латинский язык «Механических проблем» псевдо-Аристотеля и автор пространного комментария к ним. Придерживался аналогичной точки зрения.

3. *Дж. Бенедетти* (1530-1590) – непосредственный предшественник Галилея. Бенедетти: «Чем быстрее движется ядро (мяч) насильственным движением, тем большей склонностью к движению по прямой линии оно обладает и поэтому тем меньше оно стремится к центру мира и от этого становится *легче*». Тезис Бенедетти противоречит постулату классической механики, согласно которому силы, приложенные к телу, обладают независимым действием. Из этого тезиса следует, в частности, что свободно падающее тело упадет на землю раньше, нежели тело брошенное горизонтально с той же высоты.

Вращение волчка – механическая аналогия, положенная в основу идеи трехчастной баллистической траектории (XVI в.)

В доклассической механике представление о свойствах движения, недоступного для наблюдения, могло формироваться по аналогии с движением, доступным для наблюдения. В XVI в. представление о трехчастной баллистической траектории было навеяно «сходством» между фазами полета снаряда и вращения волчка.

Во вращении волчка наблюдаются три фазы. Сначала он вращается вокруг вертикальной оси. В продолжение этой фазы импетус, приданный волчку, полностью «побеждает» его тяжесть, и движение (вращение) осуществляется строго в горизонтальной плоскости. С течением времени импетус ослабевает, и угловая скорость волчка падает. При снижении скорости до некоторой критической величины волчок, продолжая вращаться, наклоняется. При этом его ось спиралеобразно отклоняется от вертикали; говоря современным языком, начинается прецессия. В продолжении этой фазы импетус и сила тяжести «борются» между собой. Наконец, на последнем этапе тяжесть полностью «побеждает» импетус, и волчок падает. Механики XVI в. считали, что брошенное тело или артиллерийский снаряд ведут себя сходным образом.

На аналогию с волчком ссылались Леонардо да Винчи, Бернардино Бальди, Дж. Бенедетти.

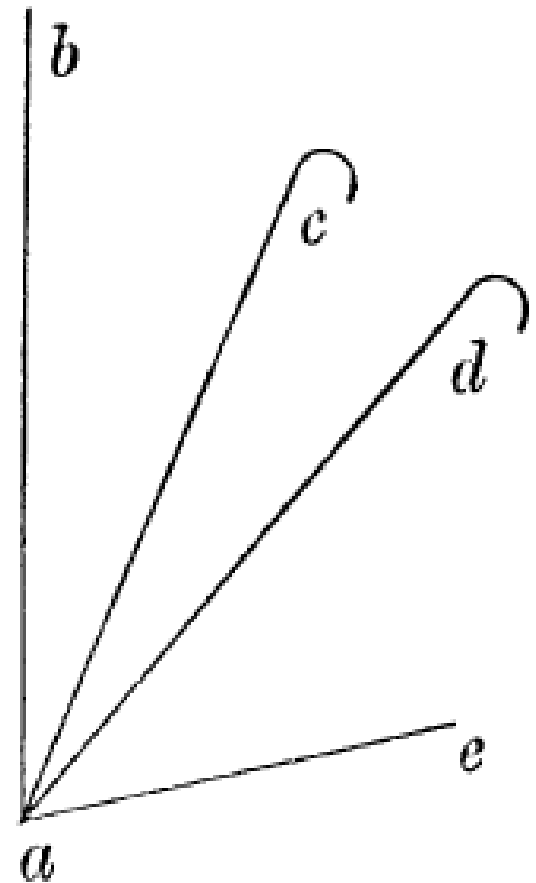
Галилей, *De motu antiquiora* (ок. 1590)

Глава «Почему брошенные тела дольше движутся по прямой линии, чем те, что брошены с той же силой, но под более острым углом к горизонту».

Ответ Галилея (следует Тарталье):

«Несмотря на то, что движущая сила артиллерийских орудий одна и та же, тем не менее, чем больше угол возвышения, тем большая часть этой силы запечатлевается в железных ядрах».

И как следствие: величина начального прямолинейного отрезка траектории возрастает с увеличением угла возвышения (рисунок принадлежит Галилею).



Томас Диггс (Thomas Diggs), *Stratoticos*, 1579

Задаёт теоретические вопросы о форме баллистической траектории:

- «Будет ли верхняя часть траектории, описываемой ядром, дугой окружности, как предположил Тарталья?»
- Или же она будет некоторым [другим] коническим сечением, [причем] разным для разных углов возвышения?
- Будет ли траектория параболической во всех ее частях для угла возвышения, при котором достигается максимальная дальность?
- Будет ли дуга, которую Тарталья считал окружностью, эллипсом для углов возвышения, меньших угла максимальной дальности?
- Будет ли эта кривая дуга гиперболой для углов возвышения, больших угла максимальной дальности?»