применяется в осн. в аппаратуре радиосвязи, в измерит. радиолокац. и др. устройствах в качестве задающих генераторов и гетеродинов.

Лит.: Голант М. Б., Бобровский Ю. Л., Минитроны, М., 1983. *М. Б. Голант.*

МИНКО́ВСКОГО ПРОСТРА́НСТВО-ВРЕ́МЯ (Минковского пространство) — четырёхмерное пространство, точки к-рого с координатами x^μ ($\mu = 0, 1, 2, 3$) сопоставляются с событиями специальной *относительности теории.* Введено в физику Г. Минковским (H. Minkowski) в 1908 с целью геом. интерпретации релятивистской теории.

Каждое событие характеризуется тремя пространственными координатами $x^i = (x^1, x^2, x^3) = (x, y, z)$ и моментом времени t, при этом удобно выбрать временну́ю координату в виде $x^0 = ct$. В М. п.-в. вводится псевдоевклидова метрика, определяющая квадрат *интервала* — «расстояния» между бесконечно близкими событиями с координатами x^μ и $x^\mu + dx^\mu$, след. образом:

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu = (x^0)^2 - \mathbf{x}^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2, \quad (1)$$

где $\eta_{\mu\nu}$ — метрич. тензор, имеющий, как видно, отличные от нуля компоненты $\eta_{\mu\nu} = \mathrm{diag}\ (1, -1, -1, -1)$. Адекватность геом. структуры М. п.-в. принципам спец. теории относительности обусловлена тем, что *Лоренца преобразования*, с помощью к-рых осуществляется переход от одной инерц. системы отсчёта (и. с. о.) к другой, оставляют метрич. тензор $\eta_{\mu\nu}$ форминвариантным. Поэтому, если ур-ния физ. теории (релятивистской механики, релятивистской гидродинамики, электродинамики и др.) записаны в виде соотношений, связывающих векторы и тензоры (или спиноры), заданные в М. п.-в., то их вид будет одинаковым во всех и. с. о. Тем самым осн. принцип спец. теории относительности будет выполняться автоматически. Фактически метрика М. п.-в. инвариантна относительно более широкой группы преобразований координат—группы Пуанкаре, включающей сдвиги начала отсчёта пространств. координат и времени, повороты пространств. осей и преобразования Лоренца:

$$x^\mu \to x'^\mu = L^\mu_\nu x^\nu + a^\mu, \quad (2)$$

где $a^\mu = \mathrm{const}$, а матрица L^μ_ν удовлетворяет соотношениям

$$L^\lambda_\mu L^\tau_\nu \eta_{\lambda\tau} = \eta_{\mu\nu}, \quad L^\lambda_\mu L^\tau_\nu \eta^{\mu\nu} = \eta^{\lambda\tau}, \quad (3)$$

причём контравариантный метрич. тензор $\eta^{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu}$ (как обычно, по повторяющемуся индексу производится суммирование).

Объединение пространства и времени в единое четырёхмерное многообразие отражает факт неабсолютности масштабов времени и пространственных расстояний, к-рые оказываются зависящими от выбора и. с. о. Напротив, одинаковой во всех и. с. о. является скорость света c, понимаемая как универс. скорость распространения фундам. физ. взаимодействий. Промежуток времени и пространственное расстояние между двумя событиями зависят от того, в какой и. с. о. эти величины измеряются; абс. значение имеет лишь интервал между событиями, вычисляемый по ф-ле (1). Инвариантным относительно преобразований (2) (исключая отражения осей) является также элемент четырёхмерного объёма $d\Omega = d^4x = dx^0d^3x = dx^0dxdydz = cdtdV$, в то время как величины dt и элемент пространственного объёма dV по отдельности не инвариантны.

Метрика М. п.-в., в отличие от евклидовой, не является положительно определённой, поэтому квадрат интервала (1) может быть положительным, нулевым или отрицательным. Поскольку величина ds^2 инвариантна относительно преобразований (2), это свойство не зависит от выбора и. с. о. и характеризует физически различные взаимоотношения между событиями. Если $ds^2 > 0$, интервал наз. времениподобным, при этом найдётся и. с. о., в к-рой эти события происходят в одной пространственной точке. Такую и. с. о. можно связать с движущейся частицей, имеющей конечную массу, тогда ds можно истолковать как (умноженный на c) промежуток *собственного времени* (т. е. измеренного по часам, движущимся вместе с частицей). Если $ds^2 < 0$, то интервал наз. пространственноподобным; в этом случае, напротив, не существует и. с. о., в к-рой события происходят в одной пространственной точке, но существует и. с. о., в к-рой эти события одновременны. Ясно, что такие события не могут быть причинно связанными друг с другом. Временна́я последовательность двух событий, разделённых пространственноподобным интервалом, неабсолютна; существует и. с. о., в к-рой первое событие предшествует второму, и другая и. с. о., в к-рой второе предшествует первому.

Нарушение при преобразованиях Лоренца временно́й последовательности событий, разделённых пространственноподобным интервалом, в совокупности с принципами квантовой теории приводит к важному следствию — необходимости существования *античастиц.* Рассмотрим два события: P_1, состоящее в испускании нейтроном π^--мезона с образованием протона, $\mathrm{n} \to \mathrm{p} + \pi^-$, и P_2, состоящее в поглощении π^--мезона др. протоном p' с образованием нейтрона n', $\mathrm{p}' + \pi^- \to \mathrm{n}'$. Вследствие *неопределённостей соотношения* имеется отличная от нуля вероятность второго события (с участием той же частицы π^-), даже если интервал s_{12} между этими событиями пространственноподобен, при условии, что $|s_{12}| \lesssim \lambda$, где λ — *комптоновская длина волны* π^--мезона. Но тогда найдётся такая и. с. о., в к-рой поглощение π^- протоном наблюдалось бы до его испускания. Разрешение парадокса в квантовой теории состоит в том, что событие P_2 можно понимать не как поглощение π^- протоном, а как испускание протоном частицы той же массы, но с противоположным знаком заряда, т. е. её античастицы — π^+-мезона: $\mathrm{p}' \to \mathrm{n}' + \pi^+$. Аналогично событие P_1 будет состоять в поглощении π^+ нейтроном с образованием протона: $\mathrm{n} + \pi^+ \to \mathrm{p}$.

Нулевое значение интервала, $ds^2 = 0$ (изотропный интервал), соответствует событиям, лежащим на *мировых линиях* безмассовых частиц, напр. фотонов, движущихся со скоростью c. Инвариантность равенства $ds = 0$ по отношению к выбору и. с. о. и выражает собой факт постоянства скорости света во всех и. с. о.

Если выбрать начало четырёхмерной системы координат в М. п.-в. в точке, отвечающей нек-рому заданному событию O, то мировые линии световых лучей, исходящих из O, будут образовывать гиперповерхность

$$c^2t^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad (4)$$

наз. *световым конусом.* Все события, лежащие внутри светового конуса (т. е. в области $c^2t^2 > x^2 + y^2 + z^2$) при $t > 0$, происходят в абс. будущем по отношению к O, в частности мировые линии частиц, движущихся со скоростью $v < c$, проходящие через O, в последующие моменты времени остаются внутри этой области. Аналогично события, лежащие внутри светового конуса при $t < 0$, абсолютно предшествуют O. Область М. п.-в., лежащая вне светового конуса (т. е. при $c^2t^2 < x^2 + y^2 + z^2$), соответствует событиям, к-рые не могут находиться в причинной связи с O, это абсолютно удалённая область. Трёхмерная гиперповерхность, проходящая через O и лежащая целиком вне светового конуса, будет пространственноподобной, в простейшем случае — это гиперплоскость, ортогональная оси времени, представляющая собой трёхмерное пространство в выбранной системе координат.

Векторы в М. п.-в. (4-векторы) при преобразованиях координат из группы Пуанкаре преобразуются по ф-ле

$$B^\mu \to B'^\mu = L^\mu_\nu B^\nu, \quad (5)$$